

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Присташ Світлана Федорівна

УДК 629.5.015.4:539.431

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ КОРПУСУ
ПІДВОДНОГО АПАРАТУ ТОРОЇДАЛЬНОЇ ФОРМИ,
ВИГОТОВЛЕНОГО НАМОТУВАННЯМ**

05.08.03 – Конструювання та будування суден

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

С.Ф. Присташ.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: Бурдун Євгеній Тимофійович, канд. техн. наук, професор

Миколаїв 2021

АНОТАЦІЯ

Пристаи С.Ф. Удосконалення методу розрахунку міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми, виготовленого намотуванням. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.03 «Конструювання та будування суден». – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2021.

В дисертаційній роботі розв’язано актуальну науково-прикладну задачу з удосконалення методу розрахунку напружено-деформованого стану міцного корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з урахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення його способом намотування волокном зі сполучником із полімерних матеріалів.

Вперше, на основі рівнянь теорії ортотропних оболонок у геометричній, фізичній, лінійній постановці отримано математичну модель згинання замкненої кругової тороїдальної оболонки під впливом гідростатичного стискання на міцний корпус підводного апарату, що дозволяє врахувати змінну жорсткість оболонки у поперечному перерізі.

Математична модель, на відміну від існуючих моделей, враховує змінну товщину оболонки в результаті використання намотування та рекомендації класифікаційного товариства Bureau Veritas, щодо оцінки пружних характеристик композиційного матеріалу за властивостями його компонентів. Встановлено, що використання традиційної теоретичної моделі оцінки за Фойхтом і Рейсом призводить до перебільшення пружних характеристик шару, в порівнянні з використанням практичних рекомендацій класифікаційного товариства Bureau Veritas для вуглепластиків на 20%, а для склопластиків на 5,6%.

За допомогою отриманої математичної моделі **удосконалено** метод розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, що

дало змогу врахувати конструктивно-технологічні фактори виготовлення із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волокном (або стрічкою). Проведено аналіз збіжності отриманих результатів. На основі аналізу було прийнято утримувати по 5 членів ряду для функцій розв'язку.

На основі удосконаленого методу розрахунку розроблено науково-аналітичну методику розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з урахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення його із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волокном. Методика надає можливість вибору сполучників, односпрямованих наповнювачів та схем армування.

Отримано закономірності впливу на напружено-деформований стан намотаного тороїдального міцного корпусу схем армування, геометричних параметрів корпусу, перспективних типів армуючих волокон та сполучників, змінної товщини оболонки та її осереднення. Встановлено, що неврахування: конструктивно-технологічних факторів виготовлення способом намотування; особливостей розрахунку композиційних матеріалів; використання спрощених методів розрахунку призводить до призменшення напружень в два рази та виникненню помилки в небезпечну сторону.

Проведено оцінку техніко-економічної ефективності використання волокнистих матеріалів для тороїдальних міцних корпусів при обмеженні за міцністю з метою створення раціональних у ваговому та технологічному відношенні корпусів, в залежності від глибини експлуатації, на початковій стадії проектування апаратів. Встановлено, що для міцних корпусів підводних апаратів тороїдальної форми найбільш раціональними прийнято епоксипластики на основі середніх за модулем вуглецевих волокон.

Отримав подальший розвиток метод розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, з врахуванням

конструктивно-технологічних факторів виготовлення способом намотування із полімерних композиційних матеріалів

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми з врахуванням конструктивно-технологічних факторів при виготовленні способом намотування із полімерних композиційних матеріалів.

2. Отримані результати та рекомендації можуть бути використані на етапі розробки техніко-економічного обґрунтування перспективних підводних апаратів з тороїдальним міцним корпусом на початкових стадіях проектування.

Практичне застосування результатів досліджень відображено у наступному: «Методика розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з врахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення його із ПКМ способом намотування волокном» (№УКФА. 362111.002.М. НУК ім. адм. Макарова, 2020. 17 с).

Впровадження результатів. Результати наукових розробок впроваджено в навчальний процес підготовки бакалаврів та магістрів кораблебудівного навчально-наукового інституту за спеціальностями 135 – «Суднобудування» та 134 – «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» (акт від 02.03.2020).

Розроблена в роботі методика впроваджена в ДП «Миколаївський суднобудівний завод» (акт від 12.03.2020 р.) м. Миколаєва для оцінки міцності корпусів підводних апаратів тороїдальної форми на початкових стадіях проектування та може в подальшому бути використана при проектуванні підводно-технічних систем і комплексів на інших підприємствах, що проектують підводні апарати.

Ключові слова: тороїдальний міцний корпус, напружено-деформований стан, гідростатичний тиск, склопластик, вуглепластик, намотування.

SUMMARY

Prystash S. F. Improvement of the method of calculating the strength of the pressure hull of an underwater vehicle of toroidal shape, made by winding. – Qualification scientific work with the rights of a manuscript.

The thesis for a Candidate of Technical Sciences degree in specialty 05.08.03 Design and building of ships. – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, 2021.

An urgent applied scientific task of the improvement of the method of evaluating the stressed-deformed state of the pressure hull of an underwater vehicle of toroidal shape in conditions of hydrostatic compression while taking into account constructive and technological factors of its production using the method of winding by fiber with polymer materials conjunction is solved in the thesis.

For the first time, basing on the equations of the theory of orthotropic shells in geometric, physical and linear setting, the mathematic model of bending of closed circular toroidal casing under the impact of hydrostatic compression of the pressure hull of an underwater vehicle, which allows taking variable rigidity of the casing in cross section into account, is developed.

This mathematical model, unlike existing models, takes into account the changes of casing thickness, caused by using winding, as well as the recommendations of Bureau Veritas classification society on the evaluation of elastic characteristics of composite materials by the properties of its components. It is found out, that the use of conventional Voigt and Reiss theoretical evaluation model leads to an exaggeration of the elastic characteristics of the layer if compared to the use of practical recommendations of Bureau Veritas classification society, which can be as high as 20 % for carbon fiber and 5.6 % for fiberglass.

The method of calculating the stressed-deformed state and evaluating the strength of the pressure hull of an underwater vehicle of toroidal shape in conditions

of hydrostatic compression was improved using obtained mathematical model. This allowed taking into account construction and technical factors of the production of pressure hull from polymer composite materials by winding with fiber (or tape). The analysis of convergence of the received results was carried out. Based on the analysis, it was decided to keep 5 members of the series for the solution functions.

Scientific-analytic methodology of calculating the stressed-deformed state and evaluating the strength of the pressure hull of an underwater vehicle of toroidal shape in conditions of hydrostatic compression, which takes into account construction and technical factors of the production of pressure hull from polymer composite materials by winding with fiber, was developed basing on the improved calculation method. This methodology offers a choice of conjunctions, unidirectional fillers and reinforcement schemes.

The regularities of the impact of reinforcement schemes, pressure hull geometric parameters, prospective types of reinforcement fibers and conjunctions, variable thickness of casing and its averaging on the stressed-deformed state of winded toroidal pressure hull were found. It was found out, that not taking into account construction and technical factors of the production by winding as well as peculiarities of composite materials calculation combined with the use of simplified calculation methods leads to halving of evaluated stresses and causing an error in the dangerous direction.

The evaluation of technical and economic efficiency of the use of fibrous materials for toroidal pressure hulls with limited strength in order to create rational pressure hulls in terms of weight and manufacturability depending on the depth of operation was performed on the initial stage of vehicles design. It was found out, that for pressure hulls of underwater vehicles of toroidal shape, the most rational choice is the use of epoxy plastics based on medium-modulus carbon fibers.

The method of calculating the stressed-deformed state and evaluating the strength of the pressure hull of an underwater vehicle of toroidal shape in conditions of hydrostatic compression, which takes into account construction and technical

factors of the production by winding from polymer composite materials, received further development.

The practical value of obtained results.

1. The algorithm of calculating stressed-deformed state and evaluating the strength of pressure hull of an underwater vehicle of toroidal shape while taking into account construction and technical factors of the production by winding from polymer composite materials was developed.

2. Obtained results and recommendations can be used on the stage of the development of technical and economic justification of prospective underwater vehicles with toroidal pressure hull on the initial stages of their design.

The practical use of the results of studies is displayed in “Methodology of calculating stressed-deformed state and evaluating the strength of pressure hull of an underwater vehicle of toroidal shape in conditions of hydrostatic compression taking into account construction and technical factors of its production from polymer composite materials by winding with fiber” (No. UKFA 362111.002.M. Adm. Makarov NUoS, 2020, 17 p.).

Implementation of results. The results of scientific developments were implemented into the educational process of training bachelors and masters of shipbuilding of the educational and scientific institute on the specialties 135 “Shipbuilding” and 134 “Aviation and rocket-space technics” (Act dated March, 03 2020).

Methodology, developed in the work, is implemented on SE “Mykolaiv shipbuilding plant” (Act dated March, 12 2020) in Mykolaiv for the evaluation of the strength of pressure hulls of an underwater vehicles of toroidal shape on the initial stages of their design and can be further used during the design of underwater technical systems and complexes on another enterprises which design underwater vehicles.

Key words: toroidal pressure hull, stressed-deformed state, hydrostatic pressure, fiberglass, carbon fiber, winding

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових фахових виданнях:

1. Присташ С.Ф., Бурдун Є.Т. Метод розрахунку міцного корпусу підводного апарату в формі тору, виконаного намотуванням. *Вісник Одеського національного морського університету*. Одеса, 2017. № 4 (53). С. 152–163. (Журнал входить до переліку наукових фахових видань України, затвердженому МОН України, та у міжнародну наукометричну базу РИНЦ)
2. Sizonenko O., Burdun E., Prystash S. Peculiarities of stress-strain state of toroidal pressure hull, made by winding. *International journal for science, technics and innovations for the industry. Machines, Technologies, Materials, PRINT* ISSN 1313 – 0226, ISSN WEB 1314-507X, Year XII Issue, 6/2018. – P. 240-243 (Журнал входить у міжнародні наукометричні бази Google Scholar, Index Copernicus, WorldCat, CAS, ROAD, eLibrary, National German Library in Leipzig)
3. Sizonenko O., Burdun E., Prystash S. Peculiarities of stress-strain state of toroidal pressure hull, made by spiral winding. *International journal for science, technics and innovations for the industry. Machines, Technologies, Materials, PRINT* ISSN 1313 – 0226, ISSN WEB 1314-507X, Year XII, Issue 11/2018. – P. 466-469 (Журнал входить у міжнародні наукометричні бази Google Scholar, Index Copernicus, WorldCat, CAS, ROAD, eLibrary, National German Library in Leipzig)
4. Присташ С.Ф. Аналіз стану та проблем розрахунку напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу для підводних апаратів. *Вісник Одеського національного морського університету*. Одеса, 2020. № 1 (61). С. 55–69. (Журнал входить до переліку наукових фахових видань України, затвердженому МОН України, та у міжнародну наукометричну базу РИНЦ)

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Бела С.Ф., Бурдун Є.Т. Рівняння згину тонкостінної ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини із полімерних композиційних матеріалів. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. Участю (Миколаїв, 22–24 трав. 2013 р.). Миколаїв: НУК, 2013. С. 220-223. (Форма участі - очна)

6. Бела С.Ф. Рівняння згину замкненої ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини виконаної намотуванням. *Макаровські читання*: матеріали конференції всеукраїнського форуму молодих науковців, присвячений Дню науки (Миколаїв, 23-24 травня 2013 р.). Миколаїв: НУК, 2013. С. 17-18.

7. Бела С.Ф., Бурдун Є.Т. Рівняння згину замкненої ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини виконаної намотуванням. *Композиционные материалы в промышленности*: матеріали 33 Міжнародної конференції (СЛАВПОЛИКОМ) (Ялта, 27-31 травня 2013р). Ялта, 2013р. С. 226-227. (Форма участі - очна)

8. Бела С.Ф. Рівняння згину міцного корпусу підводного апарату в формі тора виконаного спіральним намотуванням. *Підводна техніка і технологія*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 5-7 листопада 2014 р.). Миколаїв: НУК, 2014 р. С. 5-7. (Форма участі - очна)

9. Бела С.Ф. Рівняння згину тороїдального міцного корпусу для підводно-технічних засобів виконаних спіральним намотуванням. *Макаровські читання*: матеріали конференції всеукраїнського форуму молодих науковців (Миколаїв, 22-23 травня 2014 р.). Миколаїв: НУК, 2014 р. С. 17. (Форма участі - очна)

10. Белая С.Ф., Петрюк О.В. Напряженное состояние прочного корпуса подводного аппарата в форме тора из композиционных материалов. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських*

технічних засобів і інженерних споруд: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції (Миколаїв, 20-22 травня 2015 р.). Миколаїв: НУК, 2015 р. С. 98. (Форма участі - очна)

11. Белая С.Ф. Эффективность использования полимерных композиционных материалов для тороидальных прочных корпусов подводных аппаратов выполненных намоткой. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування*: матеріали 6-тої Міжнародної науково-практичної конференція (Херсон, 24-25 вересня 2015 р.). Херсон: Херсонська державна морська академія, 2015 р. С. 168 – 169. (Форма участі - заочна)

12. Белая С.Ф., Петрюк О.В. Эффективность использования полимерных композиционных материалов для тороидальных прочных корпусов подводных аппаратов. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференція (Миколаїв, 24 – 27 вересня 2015.). Миколаїв: НУК, 2015. С. 57-59. (Форма участі - очна)

13. Белая С.Ф., Бурдун Е.Т. Влияние схемы намотки на прочность тороидального прочного корпуса подводного аппарата при гидростатическом сжатии. *Підводна техніка і технологія*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 18-20 листопада 2015 р.). Миколаїв: НУК, 2015 р. С. 3 - 6. (Форма участі - очна)

14. Бурдун Е.Т., Белая С. Ф., Оценка эффективности использования композиционных материалов для тороидальных прочных корпусов. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 19-20 травня 2016 р.). Миколаїв: НУК, 2016 р. С 110 – 112. (Форма участі - очна)

15. Белая С. Ф., Бурдун Е.Т. Напряженно-деформированное состояние тороидального прочного корпуса подводного аппарата при различных схемах намотки. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали VII

міжнародної науково-технічної конференції (Миколаїв, 12 – 14 жовтня 2016 р.). Миколаїв: НУК, 2016 р. С. 84–86. (Форма участі - очна)

16. Бурдун Є.Т., Присташ С.Ф. Напружено-деформований стан міцного корпусу підводного апарату в формі тору. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 17-18 травня 2017 р.). Миколаїв: НУК, 2017 р. С 116 – 118. (Форма участі - очна)

17. Присташ С. Ф., Бурдун Е.Т. Напружено-деформований стан міцного корпусу підводного апарату у формі тору, виготовленого із ПКМ. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції (Миколаїв, 11 – 13 жовтня 2017 р.). Миколаїв: НУК, 2017 р. С. 117–118 (Форма участі - очна)

18. Бурдун Є.Т., Присташ С.Ф. Аналіз напружено-деформованого стану міцного корпусу підводно-технічних засобів в формі тору виконаних із ПКМ при різних схемах намотування. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 23 – 24 травня 2018 р.). Миколаїв: НУК, 2018 р. С 81-82. (Форма участі - очна)

19. Присташ С. Ф. Про розрахунок міцного корпусу підводно-технічних засобів в формі тору виготовленого із ПКМ методом намотування. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті*: матеріали X міжнародної науково-практичної конференції (Херсон, 29 – 31 травня 2018 р.). Херсон: Херсонська державна морська академія, 2018 р. С. 238-239. (Форма участі - очна)

20. Бурдун Є.Т., Присташ С.Ф. Аналіз напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу підводно-технічного засобу, виготовленого спіральним намотуванням. *Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування*: матеріали V міжнародної науково-технічної

конференції (Миколаїв, 17 – 19 жовтня 2018 р.). Миколаїв: НУК, 2018 р. С 20-21. (Форма участі - очна)

21. Присташ С.Ф. Особливості напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу виконаного намотуванням із ПКМ. *Сучасні технології обробки матеріалів*: матеріали всеукраїнської наукової конференції (Миколаїв, 01 –02 листопада 2018 р.). Миколаїв: ІПіТ НАН України, 2018 р. С 25. (Форма участі - очна)

22. Бурдун Е.Т., Присташ С. Ф., Гейко С.П., Копійка С.В.. Порівняння методів оцінки ефективних пружних характеристик тороїдального міцного корпусу підводного засобу виконаного намотуванням волокном. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції (Миколаїв, 26 – 28 вересня 2019 р.). Миколаїв: НУК, 2019 р. С. 239–243 (Форма участі - очна)

23. Бурдун Є.Т., Присташ С.Ф. Аналіз впливу змінної товщини тороїдального корпусу підводного засобу на його напружено-деформований стан. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 20-21 травня 2020 р.). Миколаїв: НУК, 2020 р. С 111-114. (Форма участі - очна)

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень та термінів.....	16
Вступ.....	19
1. Аналіз стану та проблем розрахунку напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу для підводних апаратів.....	27
1.1 Сучасний стан проблеми проектування тороїдальних міцних корпусів із полімерних композиційних матеріалів для підводних апаратів.....	27
1.2 Огляд робіт з дослідження напружено-деформованого стану тороїдальної оболонки під впливом зовнішнього рівномірного тиску.....	33
1.3 Висновки за розділом 1.....	38
2. Обґрунтування теми дисертаційного дослідження і методів виконання досліджень.....	39
2.1 Обґрунтування теми дисертаційного дослідження та постановка задачі	39
2.2 Методи виконання досліджень	43
2.3 Конструктивно-технологічний аналіз методів намотування тороїдальних міцних корпусів.....	44
2.3.1 Метод поперечного намотування в комбінації з повздовжнім намотуванням (викладкою).....	44
2.3.2 Спіральний метод намотування	47
2.4 Вибір розрахункової моделі структури оболонки композиційного тороїдального міцного корпусу, що виготовлений способом намотування	51
2.5 Порівняння методів оцінки ефективних пружних характеристик матеріалу тороїдального міцного корпусу підводного засобу, що виготовлений намотуванням волокном (стрічкою)	53
2.6 Прикладні програми, що використовувались у дослідженнях.....	63

2.7 Висновки за розділом 2.....	64
3. Напружено-деформований стан тороїдального міцного корпусу, виготовленого намотуванням, при гідростатичному стисканні.....	66
3.1 Підходи та особливості розрахунку намотаних тонкостінних композиційних конструкцій	66
3.2 Вибір основного критерію міцності тороїдального міцного корпусу	67
3.3 Загальний метод розрахунку напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу, виготовленого намотуванням із полімерних композиційних матеріалів, при гідростатичному стисканні.....	72
3.4 Теоретичні залежності, які описують напружено-деформований стан ортотропного тороїдального міцного корпусу, що знаходиться під впливом зовнішнього тиску	74
3.5 Напружено-деформований стан тороїдального міцного корпусу, виготовленого методом поперечного намотування в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою), при гідростатичному стисканні.....	78
3.5.1 Аналіз збіжності рядів розв'язку.....	81
3.6 Аналіз напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу, виготовленого способом поперечного намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням, при гідростатичному стисканні	83
3.7 Аналіз напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу, виготовленого способом спірального намотування, при гідростатичному стисканні.....	87
3.7 Висновки за розділом 3.....	94
4. Дослідження параметрів напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу, що виготовлений намотуванням із композиційних матеріалів, при гідростатичному стисканні.....	96

4.1 Вплив схеми намотування та врахування змінної товщини тороїдального міцного корпусу, що виготовлений намотуванням із полімерних композиційних матеріалів, на напружено-деформований стан, при гідростатичному стисканні.....	96
4.2 Аналіз впливу пружних властивостей різних конструкційних матеріалів на величину прогину тороїдального міцного корпусу при гідростатичному стисканні	99
4.3 Порівняльний аналіз методів розрахунку напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу.....	103
4.4 Висновки за розділом 4.....	106
5. Оцінка ефективності міцного корпусу підводного апарату тороїдальної форми, що виготовлений способом намотування, на початкових стадіях проектування.....	108
5.1 Аналіз впливу фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів та геометрії міцного корпусу тороїдальної форми на його масогабаритні показники з позиції умови міцності.....	108
5.2 Оцінка техніко-економічної ефективності використання вуглепластика та склопластика в міцних корпусах підводних апаратів тороїдальної форми.....	114
5.3 Висновки за розділом 5.....	117
ВИСНОВКИ.....	119
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	121
Додаток А. Методика розрахунку напружено-деформованого стану міцного корпусу із полімерних композиційних матеріалів.....	136
Додаток Б. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	155
Додаток В. Список публікацій за темою дисертації	158

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

НДС – напружено-деформований стан

ПКМ – полімерний композиційний матеріал

НДР – науково-дослідна робота

СП – склопластик

ВП – вуглепластик

$m_{ПК}$ – маса міцного корпусу

m_w – водотоннажність міцного корпусу

КЗО – коефіцієнт заповнення об'єму

p – гідростатичний тиск

k – параметр, який характеризує геометрію тору

a – внутрішній радіус кругового поперечного перерізу тору

R – відстань від вісі обертання до центру меридіанного перетину тору

h – товщина ізотропного корпусу

r – відстань від вісі обертання θ - θ до деякої точки $K(\theta)$ серединної поверхні у меридіанному перерізі замкненої тороїдальної оболонки

r_0 – максимальний радіус обертання тора (на зовнішньому екваторі)

θ – полярний кут в площині меридіана кругової повної тороїдальної оболонки

ψ – кут в площині паралельного кола тороїдальної оболонки

ϕ – кут армування (намотування)

$h_{\text{повзд}}$, h_2 – товщина повздовжнього шару односпрямованого полімерного композиційного матеріалу (армуючої стрічки)

$h_{\text{п}}$, h_1 – товщина поперечного шару односпрямованого полімерного композиційного матеріалу (армуючої стрічки)

R – відстань від вісі обертання до центра меридіанного перерізу

h_m – постійна, осереднена за меридіаном намотаного тороїдального міцного корпусу, товщина оболонки

Δ_m – відносна осереднена товщина оболонки корпусу

h_{max} – найбільша товщина стінки тороїдального міцного корпусу, що виготовлений намотуванням із полімерних композиційних матеріалів

h_{min} – найменша товщина стінки тороїдального міцного корпусу, що виготовлений намотуванням із полімерних композиційних матеріалів

E_{θ} – модуль пружності багатошарового ортотропного полімерного композиційного матеріалу в меридіанному напрямку

E_{ψ} – модуль пружності багатошарового ортотропного полімерного композиційного матеріалу в повздовжньому напрямку

$E_{1ш}$ – модуль пружності шару вздовж напрямку армування

$E_{2ш}$ – модуль пружності шару поперек напрямку армування

$\mu_{21ш}$ – коефіцієнт Пуассона матеріалу шару

E_B – модуль пружності армуючого матеріалу

E_M – модуль пружності сполучника

μ_B – коефіцієнт Пуассона армуючого матеріалу

μ_M – коефіцієнт Пуассона сполучника

η – коефіцієнт об'ємного заповнення армуючим матеріалом

ГСП – геодезичне спіральне намотування

РСП – радіальне спіральне намотування

φ_0 – кут армування на максимальному радіусі (екваторі) тору кругового поперечного перерізу

$h_{SG}(\theta, k)$ – товщина шару оболонки по меридіану при спіральному геодезичному намотуванні

φ_{0G} – початковий кут геодезичного намотування для тороїдальних оболонок кругового поперечного перерізу

$h_{SR}(\theta, k)$ – товщина шару оболонки по меридіану при рівноважній схемі армування

$h_{\Pi}(\theta, k)$ – товщина поперечного шару оболонки вздовж меридіану

l_1 – кількість повздовжніх шарів

l_2 – кількість поперечних шарів

l_{φ} – кількість парних шарів оболонки при перехресному симетричному намотуванні

$h_{\Pi m}$ – осереднена товщина поперечного шару оболонки

CF – коефіцієнт безпеки

σ_{θ} – кругові напруження в шаруватому ПКМ

σ_{ψ} – повздовжні напруження в шаруватому ПКМ

$u(\theta)$ – тангенціальне переміщення т. $K(\theta)$ вздовж кутової координати θ

$w(\theta)$ – радіальне переміщення т. $K(\theta)$ за радіусом меридіанного перерізу тора

h_{SW} – розрахункова глибина занурення

H_{SW} – робоча глибина занурення

f_s – коефіцієнт безпеки

ВСТУП

Дисертацію присвячено аналітичному вирішенню задачі напружено-деформованого стану (НДС) порожнистої замкненої тороїдальної оболонки, яка виготовлена з полімерного композиційного матеріалу методом намотування. Використання полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) надає міцним корпусам (вони безнабірні) підводно-технічних засобів переваги перед аналогічними корпусами з традиційних сплавів за відносною (ефективною) масою та за значенням верхнього критичного тиску (граничною глибиною занурення).

На сьогодні, роботи пов'язані з тороїдальними оболонками, як несучими оболонками міцних корпусів, описують лише варіанти оригінальних архітектурно-конструктивних компонувань зовнішнього вигляду підводних апаратів та конструкцій з міцними корпусами у формі тору, обмежуються дослідженнями НДС та стійкості ізотропних та ортотропних тороїдальних оболонок, що навантажені зовнішнім рівномірним тиском, без врахування конструктивно-технологічних особливостей їх виготовлення (К.Ф. Черних, В.О. Шаміна, Т.І. Кошелева, В.І. Гуляєв, В.В. Гайдайчук, Н.О. Чаплин, Я.М. Григоренко, М.С. Ганеева, Л.О. Косолапова, О.С. Вольмір, J. Blachut, В.В. Новожилов та інші). Результатів цих досліджень недостатньо для подальшого удосконалення технічних рішень при проектуванні тороїдального міцного корпусу, оскільки – використання КМ потребує нового підходу до проектування несучої оболонки міцного корпусу в формі замкненого тору з врахуванням конструктивно-технологічних особливостей при виготовленні її методом намотування.

Оцінці залежності верхнього критичного зовнішнього тиску оболонки від виду намотування: поперечного намотування в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою), спірального намотування та кутів намотування, присвячено роботу кандидата технічних наук Крептюк А.В. Результати згаданої

роботи підтверджують ефективність використання намотаного волокном безнабірного міцного корпусу підводного судна.

Питання оцінки міцності корпусу тора зі змінною за меридіаном товщиною, в залежності від геометрії, кута спірального намотування, мінімальної товщини корпусу оболонки та інших, залишаються невирішеними на шляху впровадження тора в підводне суднобудування. В цьому полягає наукова новизна та практична цінність запропонованої розробки.

Актуальність теми дисертаційної роботи обумовлена:

перспективністю міцних корпусів тороїдальної форми для підводних апаратів;

- необхідністю вирішення питання з оцінки міцності корпусу тора зі змінною по меридіану товщиною, в залежності від геометрії, схеми армування, кута спірального намотування, мінімальної товщини оболонки корпусу та інші залишаються невирішеними на шляху просування тора в підводне суднобудування;

- відсутністю методу розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми з урахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення способом намотування волокном (або стрічкою) із полімерних композиційних матеріалів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота містить результати досліджень, які було отримано при виконанні наступних науково-дослідних робіт (НДР): держбюджетної НДР №1715 «Розробка методів проектування суднових конструкцій із полімерних композиційних матеріалів при статичних і динамічних навантаженнях» (2009-2010 р.р., номер державної реєстрації 0109U002221), держбюджетної НДР №2045 «Наукові основи проектування складів і структур легкового композитних матеріалів плавучості для підводних засобів освоєння ресурсів океану» (2018-2020 р.р., номер державної реєстрації 0118U003871), в яких здобувач брав участь як виконавець. Дисертаційна робота відповідає основним напрямкам досліджень Кораблебудівного навчально-наукового інституту НУК

та узгоджується з наступними нормативними актами України: Законом «Про проведення економічного експерименту щодо державної підтримки суднобудівної промисловості» № 5209-VI від 06.09.2012 р.; Законом «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», стаття 4, пункт 2 «Освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння та військової техніки» (№ 5460-VI від 16.10.2012 р.); «Морською доктриною України на період до 2035 року», що затверджено постановою Кабінету Міністрів України №137-209-п (редакція від 28.12.2018 р.); Законом «Про внесення змін до Митного кодексу України (щодо збереження та розвитку вітчизняної суднобудівної промисловості)» № 6475 від 19.05.2017 р.

Мета дисертаційного дослідження полягає в розробці методу розрахунку міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з урахуванням конструктивно-технологічних факторів його виготовлення із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волокном.

Задачі дисертаційного дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі.

1. Визначити сучасний стан проблеми розрахунку міцності корпусу підводного апарату в формі тору при гідростатичному стисканні та доцільності враховування конструктивно-технологічних факторів виготовлення тору із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волокном (або стрічкою).
2. Теоретично обґрунтувати та розробити математичну модель напружено-деформованого стану та зробити оцінку міцності при гідростатичному стисканні замкненої кругової тороїдальної оболонки, що виготовлена із полімерного композиційного матеріалу способом намотування, яка б враховувала шарувату структуру полімерного композиційного матеріалу та конструктивно-технологічні фактори, в залежності від схеми армування.

3. Отримати аналітичний розв'язок для компонентів напружено-деформованого стану і оцінки міцності тороїдального міцного корпусу при гідростатичному стисканні, на базі якого виявити залежність міцності від: схеми армування, геометричних параметрів тору, перспективних типів армуючого наповнювача та сполучника, змінності товщини намотаного корпусу.
4. Розробити методику розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, виготовленого способом намотування, з врахуванням конструктивно-технологічних факторів, яка включає в себе можливість вибору сполучників, односпрямованих наповнювачів та схем армування з метою вибору оптимальної структури армування і складу полімерного композиційного матеріалу.
5. Зробити оцінку техніко-економічної ефективності використання високоміцних волокнистих матеріалів для тороїдальних міцних корпусів при обмеженні за міцністю, з метою створення раціональних у ваговому та технологічному відношенні корпусів, в залежності від глибини експлуатації, на початковій стадії проектування апаратів.

Об'єктом дослідження є процес впливу конструктивно-технологічних факторів виготовлення із армованих композиційних матеріалів способом намотування міцного корпусу підводного апарату тороїдальної форми на його напружено-деформований стан і міцність при гідростатичному стисканні.

Предметом дослідження є метод розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми із армованого композиційного матеріалу, виготовленого способом намотування.

Для виконання досліджень використовувались наступні методи:

- загальнонаукові методи та прийоми дослідження (формалізація, гіпотетико-дедуктивний метод, аналіз та синтез, абстрагування, узагальнення, ідеалізація, індукція, аналогія та моделювання) у всіх

виконаних в дисертаційній роботі дослідженнях та при розв'язку практичних задач;

- методи математичного моделювання пружних характеристик ортотропних композиційних матеріалів на основі відомих властивостей компонентів за теоретичною моделлю оцінки за Фойхтом і Рейсом та практичними рекомендаціями класифікаційного товариства *Bureau Veritas* (Франція);
- положення лінійної теорії пружності шаруватих ортотропних оболонок обертання (гіпотези Ламе) для побудови математичної моделі напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу, отриманого способом намотування із полімерних композиційних матеріалів;
- метод Бубнова-Гальоркіна для розв'язання системи диференціальних рівнянь.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в удосконаленні методу розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, з врахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення способом намотування із полімерних композиційних матеріалів.

В результаті досліджень отримано наступні наукові результати:

1. **Вперше**, на основі рівнянь теорії ортотропних оболонок у геометричній, фізичній, лінійній постановці отримано математичну модель згинання замкненої кругової тороїдальної оболонки під впливом гідростатичного стискання на міцний корпус підводного апарату, що дозволяє врахувати змінну жорсткість оболонки у поперечному перерізі. Математична модель, на відміну від існуючих моделей, враховує змінну товщину оболонки, що утворюється в результаті використання намотування та рекомендації класифікаційного товариства *Bureau Veritas*, щодо оцінки пружних характеристик композиційного матеріалу за властивостями його компонентів.

2. За допомогою отриманої математичної моделі **удосконалено** метод розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, що дало змогу врахувати конструктивно-технологічні фактори його виготовлення із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волокном (або стрічкою).

3. Отримано закономірності впливу на напружено-деформований стан намотаного тороїдального міцного корпусу: схем армування, геометричних параметрів корпусу, перспективних типів армуючих наповнювачів та сполучників, змінної товщини та її осереднення. Встановлено, що неврахування конструктивно-технологічних факторів виготовлення способом намотування та особливостей розрахунку властивостей композиційних матеріалів і використання спрощених методів розрахунку призводить до зменшення напружень в два рази та виникненню помилки в небезпечну сторону.

4. **Отримав подальший розвиток** метод розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, з врахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення способом намотування із полімерних композиційних матеріалів

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми з врахуванням конструктивно-технологічних факторів при виготовленні способом намотування із полімерних композиційних матеріалів.

2. Отримані результати та рекомендації можуть бути використані на етапі розробки техніко-економічного обґрунтування перспективних підводних апаратів з тороїдальним міцним корпусом на початкових стадіях проектування.

Практичне застосування результатів досліджень відображено у наступному: «Методика розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному

стисканні з врахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення його із ПКМ способом намотування волокном» (№УКФА. 362111.002.М. НУК ім. адм. Макарова, 2020. 17 с).

Впровадження результатів. Результати наукових розробок впроваджено в навчальний процес підготовки бакалаврів та магістрів кораблебудівного навчально-наукового інституту за спеціальностями 135 – «Суднобудування» та 134 – «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» (акт від 02.03.2020).

Розроблена в роботі методика впроваджена в ДП «Миколаївський суднобудівний завод» (акт від 12.03.2020 р.) м. Миколаєва для оцінки міцності корпусів підводних апаратів тороїдальної форми на початкових стадіях проектування та може в подальшому бути використана при проектуванні підводно-технічних систем і комплексів на інших підприємствах, що проектують підводні апарати.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі використано наукові результати, що отримані особисто автором. В публікаціях, що написані в співавторстві, здобувачу належать такі наукові результати: [49] – аналіз сучасного стану проблеми проектування тороїдальних міцних корпусів із полімерних композиційних матеріалів для підводних апаратів, [106] – виведення рівнянь рівноваги для розрахунку напружено-деформованого стану ортотропних тороїдальних оболонок змінної товщини; [107, 108] – отримання розрахункових даних щодо впливу схеми армування, геометрії тору, типів армуючих наповнювачів та сполучника, змінної товщини та її осереднення в намотаному тороїдальному корпусі на величину напружень в тороїдальних оболонках під впливом гідростатичного тиску.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи було представлено на 20 конференціях: Міжнародна науково-практична конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (м. Миколаїв, 2012–2017, 2019 рр.); Міжнародна конференція «Композиционные материалы в промышленности» (СЛАВПОЛИКОМ) (м. Ялта, 2013 р.); Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю

«Підводна техніка і технологія» (м. Миколаїв, 2014-2015 рр.); Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (м. Херсон, 2015 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (м. Херсон 2018 р.); International scientific congress – summer session «Machines. Technologies. Materials» (м. Варна, 2018 р.); Міжнародна науково-технічна конференція "Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування" (м. Миколаїв, 2018 р.); Всеукраїнська наукова конференція "Сучасні технології обробки матеріалів" (м. Миколаїв, 2018 р.); Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (м. Миколаїв, 2013–2020 рр.).

Публікації. Результати роботи опубліковано в 4 статтях у наукових фахових виданнях України (1 без співавторів), періодичних виданнях іноземних держав та виданнях, що входять до наукометричних баз даних (НМБ), 19 тезах доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, 3 додатків, списку використаних джерел із 130 найменувань. Основний обсяг дисертації міститься на 163 сторінках та включає 48 ілюстрацій і 6 таблиць. Обсяг додатків складає 28 аркушів.

1. АНАЛІЗ СТАНУ ТА ПРОБЛЕМ РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТОРОЇДАЛЬНОГО МІЦНОГО КОРПУСУ ДЛЯ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ

1.1 Сучасний стан проблеми проектування тороїдальних міцних корпусів із полімерних композиційних матеріалів для підводних апаратів

Існуюча підводна техніка досить різноманітна: підводні човни, підводні апарати (самохідні, несамохідні, автономні, населені та ненаселені), підводні лабораторії (рухомі та стаціонарні) [1-6]. Всі вони відрізняються за різноманітністю технічних елементів, принципами роботи, формою. Перш за все, це обумовлено призначенням та умовами роботи апарату. Останні десятиліття підводна техніка розвивається з впровадженням нових матеріалів та технологій, що забезпечує створення багатофункціональних апаратів.

Основними компонентами населених підводно-технічних засобів освоєння океану є:

- 1) міцний корпус, що захищає екіпаж від дії зовнішнього тиску, а в випадку безлюдного підводного апарату – захищає електроніку;
- 2) призначене для спостереження обладнання;
- 3) матеріал плавучості;
- 4) джерело енергії та перетворювач потужності (рушійний комплекс). Ці компоненти, взяті як окремо так і разом, складають значну частину початкової вартості судна та накладають обмеження на робочі характеристики судна, його розміри і об'єми.

Міцний корпус – це один з найбільших та важких компонентів підводних апаратів. Корпус повинен бути компактним та легким настільки, наскільки це можливо, при цьому – мати відповідну міцність та стійкість, щоб мати змогу протистояти зовнішньому гідростатичному тиску. При проектуванні міцного корпусу необхідно обрати його форму, матеріал, товщину оболонки корпусу, що визначається робочою глибиною занурення та

коефіцієнтом безпеки, а також: спроектувати ілюмінатори, люки, торцові кришки, гермовводи.

Міцні корпуси підводних технічних засобів, зазвичай, мають форму кругових циліндрів, сфер, еліпсоїдів, конусів та куполів. Переваги та недоліки різних форм міцних корпусів представлено в табл. 1.1. [7].

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки форм міцних корпусів підводних апаратів

	Переваги	Недоліки
Сфера	1. Найкраще відношення маси до водотоннажності. 2. Легкість створення отворів в корпусі. 3. Аналіз напруженого стану більш точний та найменш складний.	1. Складність внутрішнього розміщення. 2. Великий гідродинамічний опір руху.
Еліпсоїд	1. Хороше відношення маси до водотоннажності. 2. Більш ефективне внутрішнє розміщення. 3. Легкість створення отворів в корпусі.	1. Більша вартість виготовлення. 2. Складний розрахунок конструкцій.
Циліндр	1. Найбільш простий у виготовленні. 2. Найбільш ефективне внутрішнє розміщення. 3. Круговий циліндр має хорошу гідродинамічну форму, кращу, ніж у сфери того ж об'єму. 4. Збільшення об'єму внутрішнього корпусу може бути досягнуто за рахунок збільшення довжини циліндра.	1. Найменш ефективне відношення маси до водотоннажності. 2. Необхідні ребра жорсткості на глибинах більше за 300 м. 3. Складний розрахунок конструкції з отворами в циліндричному корпусі. 4. Підводні апарати і човни з циліндричним корпусом не можуть легко рухатись та маневрувати в 3-х напрямках.
Тор	1. Хороша гідродинамічна форма. 2. Можливість виготовлення методом намотування із КМ. 3. Тороїди малочутливі до початкової недосконалості геометрії.	1. Складний розрахунок конструкції з отворами в тороїдальному корпусі.

З аналізу таблиці видно, що сферична оболонка є найбільш ефективним міцним корпусом, оскільки такий корпус поводить себе як ідеальна мембрана. Населені підводні апарати, які занюрювались до дна Маріанської впадини (11 000 м), мали сферичний міцний корпус. Але, незважаючи на цей факт,

більшість підводних апаратів та підводних човнів не базуються на сферичних оболонках тому, що такі апарати не задовольняють за гідродинамічними характеристикам, можуть створювати труднощі при стиковці, внутрішній простір сфери неефективний для розміщення пасажирів та обладнання.

Відомі оригінальні проекти [8-28] підводних апаратів, суден та підводних бурових платформ, станцій (рис.1.1) з міцним корпусом в формі тору. Їх поява обумовлена рядом переваг тороїдальної форми. Тороїдальний міцний корпус має гідродстатичну форму, з великою остійністю на поверхні води. За рахунок подвійної кривизни тору ,товщина стінки міцного корпусу в порівнянні з циліндричною формою може бути зменшена в 1,5 – 2 рази [22].

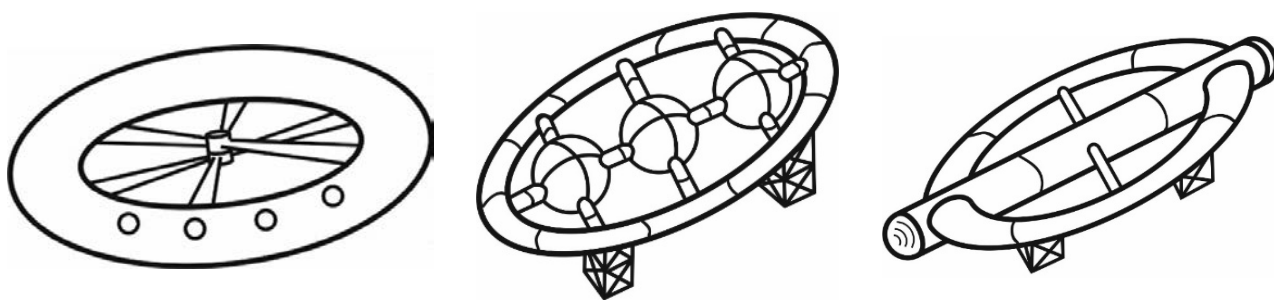


Рисунок 1.1 – Проекти підводно-технічний засібів з міцним корпусом в формі тору

В 1988 році фірма Mar.Ital побудувала самохідний малий рятівний підводний човен. Корпус якого зібрано з тороїдальних зігнутих зварних сталевих труб (рис. 2) (зовнішній діаметр – 7,5 м та товщина стінок – близько одного сантиметра). Глибина занурення – до 400 м [29].

В [10] запропонована модель великогабаритного підводного технічного засобу, міцний корпус якого має форму тору. У вільному центральному просторі тороїдального міцного корпусу встановлено вертикальний гвинт з лопатями.

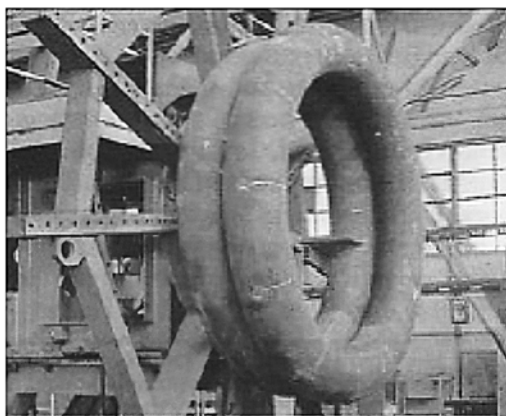


Рисунок 1.2 – Зварювання тороїдальних елементів

В роботі [11] описується проект автономного підводного судна, що складається з однієї або декількох тороїдальних оболонок в якості міцних корпусів, розміщених в обтічному легкому корпусі. Така конструкція буде створювати ефект «крила», що зменшить опір руху в водному середовищі та збільшить маневреність безлюдного підводного апарату. Оснащення такого підводного апарату, наприклад, комплексом спеціально орієнтованих водометних рушіїв, дозволить здійснювати повздовжній рух, просторове маневрування та стабілізацію апарату в водному середовищі при виконанні ним робочих операцій. Переріз тороїдальної оболонки може бути круговим або еліптичним, в якому найбільша піввісь розташована вздовж центральної вісі тороїдальної оболонки. Тороїдальні міцні корпуси передбачається виготовляти методом намотування із композиційних матеріалів.

Вибір авторами [10-11] тороїдальної оболонки в якості міцного корпусу обумовлено рядом її переваг. Дослідження статичної та динамічної стійкості сталевих тороїдальних оболонок показали, що тороїди малочутливі до початкової недосконалості геометрії, що прямо протилежно до чутливості півсфер, торцевих поверхонь різних форм та циліндричних оболонок, які є стандартними геометричними формами для міцних корпусів. Виробництво тороїдальних та циліндричних міцних корпусів методом намотування дозволяє отримати ідеально круглий переріз та є технологічно простішою процедурою, ніж виготовлення їх з металу шляхом зварювання з попередньо

зігнутих або штампованих листів заготовок, а також дозволяє зменшити масу підводного судна.

Також, розробляються нові проекти підводних лабораторій та глибоководних платформ, міцним корпусом яких буде одна або декілька великогабаритних тороїдальних оболонок. Наприклад, *Westinghouse Electric Corp.* запропоновано проект житлової підводної станції, міцний корпус якої має форму тору з зовнішнім діаметром 12,2 м з круговим перерізом радіуса 1,525 м. Станція або лежить на півсферичній бетонній основі на морському дні або пришвартована до цієї основи та підіймається на потрібну глибину. Додаткові тороїдальні модулі можуть бути приєднані вертикально для розширення можливостей станції. Станція з робочою глибиною до 1800 м може використовуватись для комерційного дослідження океану, наприклад для розробки родовищ [12, 13].

Інтенсивна розробка конструкцій підводних нафтових платформ, які здатні працювати на глибинах більше 3000 м, розпочалась після відкриття вченими того, що нижче дна океану знаходиться близько 10 000 міліардів тон газу метану, велика кількість якого знаходиться в замороженому стані [14]. В більшості проектів платформ, що розробляються з цією метою, міцний корпус підводної бурової платформи для видобування метану запропоновано в формі тору [14]. Аналогічну конструкцію підводної платформи описаноа Россом та Лафолу-Лейном (1998 р.). Такі підводні конструкції можуть тривалий час знаходитись під водою стаціонарно з можливістю повільно рухатись (рис. 1.1). Необхідною умовою при цьому є хороша гідродинамічна форма тору.

Авторами [14] проведено порівняння матеріалів для підводної бурової платформи в формі тору, яка буде знаходитись на глибині до 11 000 м. Виходячи з показників питомої міцності для різних матеріалів, питома міцність ПКМ набагато вища, ніж у сталі. Так, при зануренні міцного корпусу підводного засобу, зовнішній тиск на корпус збільшується лінійно. Щоб протистояти цьому зовнішньому тиску потрібно збільшувати товщину стінки міцного корпусу. При використанні металу, міцний корпус стає настільки

важким, що не буде мати достатньої плавучості, і в результаті – без додаткової плавучості апарат потоне. Тому – для занурення на великі глибини необхідно забезпечити максимальну питому міцність. Автори показали, що єдиним матеріалом, який забезпечує необхідне співвідношення маси міцного корпусу до його водотонажності $m_{МК}/m_w < 1$, є вуглепластик. Виготовлення таких великогабаритних підводних платформ передбачається виконувати методом намотування із ПКМ. Але при цьому оболонка буде дуже товстою. Для реалізації такого проекту необхідні: розробка технології намотування товстостінної композиційної оболонки, дослідження в області оптимального проектування, пошук високоміцного волокна та сполучника.

В 1991 році Сміт [14] показав, що безнабірний круговий циліндр, зроблений зі СП, може занурюватись до 8 разів глибше, ніж аналогічний, сталевий, а із ВП в 10 разів глибше.

Останні 40 років відбувається інтенсивна розробка нових проектів підводних апаратів з міцними корпусами на основі склопластиків, вуглепластиків та кераміки, які володіють високими значеннями питомої міцності та жорсткості – основних характеристик для ефективного використання в підводному суднобудуванні. [23, 30-35] Оскільки, такі метали як високоміцна сталь, титанові та алюмінієві сплави, не мають резерву для зменшення маси корпусу, то використання ПКМ забезпечує.

Велика кількість невідомих та складний напружений стан, який притаманний композитам, роблять проектування виробів із композиційних матеріалів досить трудомістким та складнішим, ніж для виробів із звичайних ізотропних матеріалів, деякі питання залишаються до цих пір не вирішеними. Розуміння цих проблем потребує подальшого дослідження.

1.2 Огляд робіт з дослідження напружено-деформованого стану тороїдальної оболонки під впливом зовнішнього рівномірного тиску

Основним навантаженням для тороїдального міцного корпусу підводного апарату є гідростатичний тиск, який викликає рівномірне статичне стискання міцного корпусу. При цьому в міцному корпусі виникають значні стискаючі напруження. Оскільки задача стійкості вирішена [36], виникає необхідність визначення напружено-деформованого стану при розрахунку на міцність. НДС замкненої в круговому та меридіанному напрямках тороїдальної оболонки, що знаходиться під дією зовнішнього рівномірного тиску, є предметом ряду досліджень. Актуальність досліджень НДС таких оболонок обумовлена широким використанням тонкостінних оболонкових конструкцій із нових багатошарових композиційних матеріалів, виконаних, в окремому випадку, методом намотування волокном, що дозволяє досягти найбільших значень коефіцієнта заповнення об'єму (КЗО) (до 70...74,05%). Та реалізує властивості армуючого наповнювача в складі матеріалу в повній мірі.

Підґрунтям з розрахунку ізотропних тороїдальних оболонок з постійною товщиною (рис.1.3), в тому числі і підкріплених ребрами, є робота Черних К.Ф. та Шаміной В.О. [37], де викладені основні методи розрахунку.

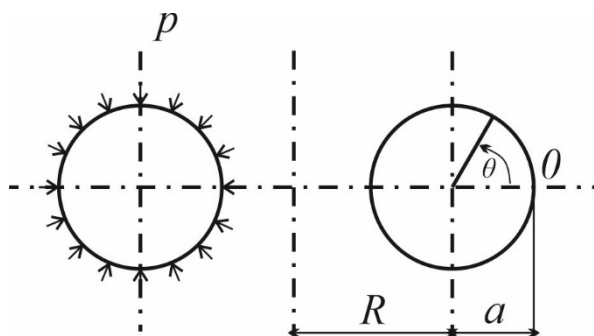


Рисунок 1.3 – Тороїдальна оболонка:

a – внутрішній радіус кругового поперечного перерізу тору;

R – відстань від вісі обертання до центру меридіанного перетину тору;

p – гідростатичний тиск

В роботі вказано, що при $k=a/R$, не дуже близьких до 1, для визначення напружень σ_θ та σ_ψ можна використовувати безмоментний розв'язок Фепля:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_\theta = -\frac{1+0,5 \cdot k \cdot \sin \theta}{1+k \cdot \sin \theta} \cdot \frac{p \cdot a}{h} \\ \sigma_\psi = -\frac{1}{2} \cdot \frac{p \cdot a}{h} \end{array} \right.$$

де, h – товщина ізотропного корпусу.

Згідно безмоментному рішення найбільш небезпечними точками є точки, що знаходяться на внутрішньому екваторі ($\theta = 180^\circ$).

В роботі [38] чисельно досліджується вплив нерівномірності розподілу інтенсивності мембранних зусиль вздовж координати θ на НДС та стійкість ізотропних оболонок з урахуванням геометричної нелінійності. Встановлено, що для ізотропної тороїдальної оболонки, яка знаходиться під впливом зовнішнього рівномірного навантаження p , з параметрами $k = 0,5$, $a/h = 100$ максимальні мембранні зусилля будуть знаходитись на внутрішньому екваторі оболонки.

Автором [39] розроблена, з позиції тривимірної лінійної теорії пружності, на основі єдиного алгоритму, загальних вихідних аналітичних та кінцево-різністних співвідношень, числова модель для розрахунку НДС багат шарових ортотропних оболонок постійної товщини (в тому числі тороїдальних), та пластин, що знаходяться під впливом зовнішнього силового. Задача розв'язана на основі залежностей тривимірної лінійної теорії пружності, що дозволяє врахувати не лише зсув в площинах, нормальних до серединної поверхні, але, також, визначити величину стискання (деформацію нормалі) шарів. Даний підхід дозволяє оцінити раціональне викладення шарів з різними пружними характеристиками по товщині. В основу розрахункової схеми покладено варіаційно-різницекий метод в формі методів кінцевих різниць.

В роботі [40] розглядається метод визначення НДС ортотропних вісесиметричних тороїдальних оболонок змінної товщини, виготовлених методом намотування. На основі нелінійної системи розв'язуючих рівнянь

Мейсснера для вісесиметричної деформації оболонки обертання отримано розв'язуюче нелінійне рівняння. Але на жаль відсутні будь-які числові результати розрахунку НДС.

В [41] досліджено НДС замкненої та незамкненої в круговому напрямку ортотропної тороїдальної оболонки довільного поперечного перерізу при несиметричних навантаженнях.

Найбільш повно числовому дослідженню НДС та стійкості тонких пружних ортотропних повних тороїдальних оболонок, що знаходяться під впливом рівномірного зовнішнього тиску, присвячені роботи Ганєєвої М.С. та Косолапової Л.О. [42-45].

В роботах [43-45] розглянуто вплив на НДС та критичні навантаження геометричних параметрів тороїдальної оболонки постійної товщини, характеристик матеріалу та врахування деформацій поперечного зсуву. В розрахункових залежностях враховано геометричну нелінійність згідно теорії середнього прогину та деформацію поперечного зсуву згідно теорії С.П. Тимошенко. Для розрахунку основного стану використовується канонічна система рівнянь, що враховує моментність та геометричну нелінійність. Нелінійна канонічна система розв'язується методом лінеаризації в поєднанні з методом додаткових функцій та ортогональної прогонки. При розрахунку повного тору використаним авторами методом постало питання про встановлення граничних умов на краях інтервалу інтегрування. Проведене дослідження впливу на НДС умов симетрії, використаних на внутрішньому та зовнішньому екваторі ізотропної або ортотропної оболонки, яка знаходиться під впливом рівномірного зовнішнього тиску, показало, що результати розв'язання задачі визначення НДС не залежать від того, на якому екваторі – внутрішньому або зовнішньому, встановлені граничні умови симетрії.

Авторами визначені найбільші за меридіаном прогини та найбільші за всім об'ємом оболонки напруження σ_θ та σ_ψ в момент вісесиметричної та невісесиметричної втрати стійкості для ортотропних тороїдальних оболонок постійної товщини. Виявлено, що найбільші напруження спостерігаються: σ_θ –

на внутрішній обмежуючій поверхні біля внутрішнього екватора, σ_ψ – на зовнішній обмежуючій поверхні в межах верхнього полюсу.

Авторами також проведено дослідження впливу еліптичної форми меридіанного перерізу та коефіцієнтів Пуассона μ_{12} , μ_{21} на напружено-деформований стан та стійкість повної тороїдальної ортотропної оболонки. Показано, що зростання коефіцієнтів Пуассона та еліптичності перерізу приводить до збільшення прогинів та зростання напружень.

В роботі [42] чисельно розв'язана задача про великі прогини тонкої кругової пружної ортотропної тороїдальної оболонки (рис.1.4) змінної товщини під впливом рівномірного зовнішнього тиску. В залежностях поставленої автором задачі, враховано геометричну нелінійність теорії середнього прогину та деформацію поперечного прогину за теорії С.П. Тимошенко.

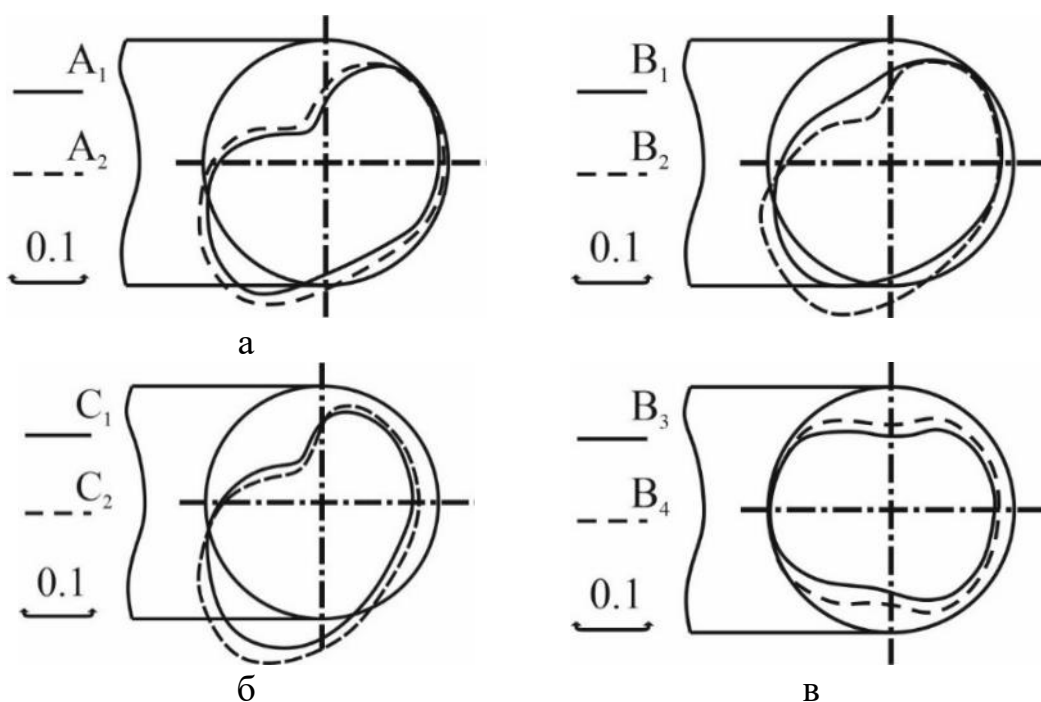


Рисунок 1.4 – Епюри прогину для тороїдальної ортотропної оболонки постійної товщини з параметрами:

$$a - E_2/E_1 = 2; \text{ б} - E_2/E_1 = 0,5; \text{ в} - E_2/E_1 = 1$$

Для розрахунку основного НДС використано канонічні системи рівнянь. Нелінійна задача основного стану розв'язана чисельно методом лінеаризації в поєднанні з методом додаткових функцій та ортогональної прогонки.

Розрахунку товстостінної ізотропної тороїдальної оболонки, що знаходиться під впливом зовнішнього рівномірного тиску присвячена робота [46]. Дана задача розв'язана варіаційно-різницеvim методом, основою якого є варіаційний принцип Лагранжа.

В роботі [47] розглянуто ізотропну тороїдальну оболонку виконану из металу.

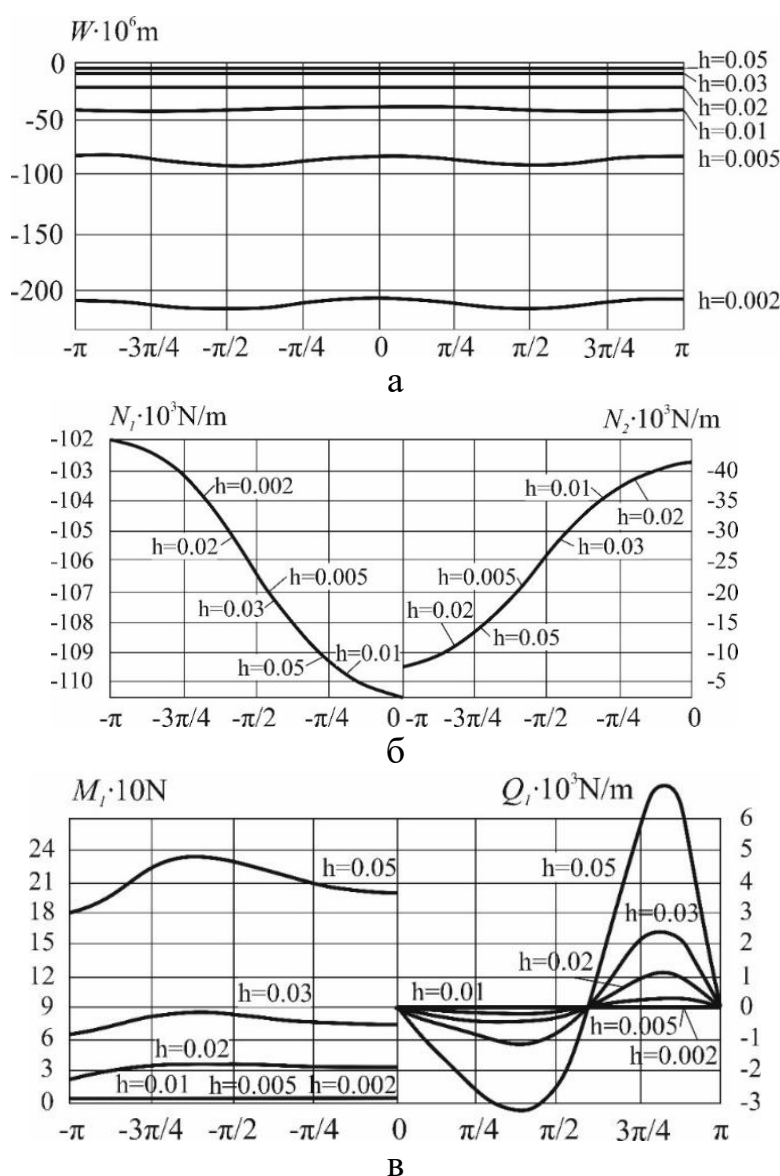


Рисунок 1.5 – Залежність напружено-деформованого стану тороїдальної оболонки від зміни товщини:

a – прогинів W ; $б$ – нормальних погонних зусиль N_1 та N_2 ; $в$ – згинаючого моменту M_1 та перерізуючої сили Q_1

Система рівнянь рівноваги тороїдальної оболонки описується диференціальними рівняннями загальної технічної моментної теорії В.З. Власова. Розв'язок даної задачі отримано в переміщеннях через ряди Фур'є. Система отриманих диференціальних рівнянь розв'язувалась за допомогою метода Бубнова-Гальоркіна. Отримані результати представлено лише у вигляді наступних графіків представлених на рис. 1.5.

В роботі [48] представлено задачу рішення НДС тороїдальної оболонки, що навантажена рівномірним внутрішнім тиском по безмоментній теорії.

1.3 Висновки за розділом 1

1. Аналіз сучасного стану проблеми проектування тороїдальних міцних корпусів із полімерних композиційних матеріалів для підводних апаратів показав, що використання тороїдального міцного корпусу для підводних апаратів має ряд переваг.
2. Аналіз робіт, присвячених дослідженню НДС тороїдальних ізотропних та ортотропних оболонок постійної та змінної товщини під впливом рівномірного зовнішнього тиску, показав відсутність дослідження, яке стосується впливу зміни товщини при поперечному намотуванні в комбінації з повздовжнім намотуванням та спіральному намотуванні волокном на НДС тороїдальної ортотропної оболонки.

Основні наукові результати опубліковані у працях автора [49].

2. ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І МЕТОДІВ ВИКОНАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Обґрунтування теми дисертаційного дослідження та постановка задачі

Дисертаційна робота повинна включати в себе наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного потенціалу України. Обрана тема повинна бути актуальною, економічно-ефективною, науково значущою, вирішувати нову науково-прикладну задачу, бути здійсненою.

Створення тороїдальних міцних корпусів підводно-технічних засобів із полімерних композиційних матеріалів є технологічно простішою процедурою ніж виготовлення аналогічних корпусів із металів. Сучасні технології намотування дозволяють виготовляти об'ємні вироби практично будь-яких розмірів. Так, намотані склопластики та вуглепластики, які мають малу густину та високу питому жорсткість та міцність, виявились досить перспективними матеріалами для виготовлення міцних корпусів, що працюють під дією зовнішнього рівномірного тиску. Відсутність методів розрахунку напружено-деформованого стану тороїдальної оболонки як міцного корпусу із ПКМ, за критерієм мінімальної маси з врахуванням особливостей ПКМ робить тему дисертаційного дослідження актуальною.

Обрана тема дисертаційного дослідження відповідає паспорту спеціальності 05.08.03 – «Конструювання та будування суден». *Формула спеціальності:* Галузь науки і техніки, яка займається розробленням та вдосконаленням методів проектування, конструювання, будування суден, інших плавучих споруд, засобів океанотехніки, підводних технічних систем і комплексів, підводних апаратів, суднових конструкцій, загальносуднових систем, суднових пристроїв та їх елементів, забезпечення їх ефективності, надійності і безпеки на протязі усього життєвого періоду.

Галузь науки, з якої присуджують наукові ступені: технічні науки.

Мета дисертаційного дослідження полягає в удосконаленні методу розрахунку міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з урахуванням конструктивно-технологічних факторів його виготовлення із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волокном.

Задачі дисертаційного дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі.

1. Визначити сучасний стан проблеми розрахунку міцності корпусу підводного апарату в формі тору при гідростатичному стисканні та доцільності врахування конструктивно-технологічних факторів виготовлення тору із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волокном (або стрічкою).

2. Теоретично обґрунтувати та розробити математичну модель напружено-деформованого стану та зробити оцінку міцності при гідростатичному стисканні замкненої кругової тороїдальної оболонки, що виготовлена із полімерного композиційного матеріалу способом намотування, яка б враховувала шарувату структуру полімерного композиційного матеріалу та конструктивно-технологічні фактори, в залежності від схеми армування.

3. Розробити аналітичний розв'язок для компонентів напружено-деформованого стану і оцінки міцності тороїдального міцного корпусу при гідростатичному стисканні, на базі якого виявити залежність міцності від схеми армування, геометричних параметрів тору, перспективних типів армуючого наповнювача та сполучника, змінності товщини намотаного корпусу.

4. Розробити методику розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, виготовленого способом намотування, з врахуванням конструктивно-технологічних факторів, яка включає в себе можливість вибору сполучників, односпрямованих наповнювачів та схем армування з метою вибору оптимальної структури армування і складу полімерного композиційного матеріалу.

5. Зробити оцінку техніко-економічної ефективності використання високоміцних волокнистих матеріалів для тороїдальних міцних корпусів при обмеженні за міцністю, з метою створення раціональних у ваговому та технологічному відношенні корпусів, в залежності від глибини експлуатації, на початковій стадії проектування апаратів.

Об'єктом дослідження є процес впливу конструктивно-технологічних факторів виготовлення із армованих композиційних матеріалів способом намотування міцного корпусу підводного апарату тороїдальної форми на його напружено-деформований стан і міцність при гідростатичному стисканні.

Предметом дослідження є метод розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми із армованого композиційного матеріалу, виготовленого способом намотування.

На рис. 2.1 представлена структурно-логічна схема виконання дисертаційного дослідження.

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН МІЦНОГО КОРПУСУ ПІДВОДНОГО АПАРАТУ В ФОРМІ ПОРОЖНИСТОЇ ЗАМКНЕНОЇ ТОРОЇДАЛЬНОЇ ОБОЛОНКИ ВИКОНАНОЇ НАМОТУВАННЯМ

ГІПОТЕЗА

Розробка методу розрахунку напружено-деформованого стану міцного корпусу підводного технічного засобу в формі тору з полімерних композиційних матеріалів призведе до зменшення маси міцного корпусу і, як наслідок, істотно знизить його собівартість

МЕТА ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

удосконалення методу розрахунку міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з урахуванням конструктивно-технологічних факторів його виготовлення із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волоконном.

Об'єктом дослідження є процес впливу конструктивно-технологічних факторів виготовлення із армованих композиційних матеріалів способом намотування міцного корпусу підводного апарату тороїдальної форми на його напружено-деформований стан і міцність при гідростатичному стисканні.

Предметом дослідження є метод розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми із армованого композиційного матеріалу, виготовленого способом намотування.

ЗАДАЧІ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Визначити сучасний стан проблеми розрахунку міцності корпусу підводного апарату в формі тору при гідростатичному стисканні та доцільності врахування конструктивно-технологічних факторів виготовлення тору із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волоконном (або стрічкою).
2. Теоретично обґрунтувати та розробити математичну модель напружено-деформованого стану та зробити оцінку міцності при гідростатичному стисканні замкненої кругової тороїдальної оболонки, що виготовлена із полімерного композиційного матеріалу способом намотування, яка б враховувала шарувату структуру полімерного композиційного матеріалу та конструктивно-технологічні фактори, в залежності від схеми армування.
3. Розробити аналітичний розв'язок для компонентів напружено-деформованого стану і оцінки міцності тороїдального міцного корпусу при гідростатичному стисканні, на базі якого виявити залежність міцності від схеми армування, геометричних параметрів тору, перспективних типів армуючого наповнювача та сполучника, змінності товщини намотаного корпусу.
4. Розробити методику розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, виготовленого способом намотування, з урахуванням конструктивно-технологічних факторів, яка включає в себе можливість вибору сполучників, односпрямованих наповнювачів та схем армування з метою вибору оптимальної структури армування і складу полімерного композиційного матеріалу.
5. Зробити оцінку техніко-економічної ефективності використання високоміцних волокнистих матеріалів для тороїдальних міцних корпусів при обмеженні за міцністю, з метою створення раціональних у ваговому та технологічному відношенні корпусів, в залежності від глибини експлуатації, на початковій стадії проектування апаратів.

НАУКОВА НОВИЗНА

Наукова новизна одержаних результатів полягає в удосконаленні методу розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, з урахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення способом намотування із полімерних композиційних матеріалів.

1. Вперше, на основі рівнянь теорії ортотропних оболонок у геометричній, фізичній, лінійній постановці отримано математичну модель згинання замкненої кругової тороїдальної оболонки під впливом гідростатичного стискання на міцний корпус підводного апарату, що дозволяє врахувати змінну жорсткість оболонки у поперечному перерізі. Математична модель, на відміну від існуючих моделей, враховує змінну товщину в результаті використання намотування та рекомендації класифікаційного товариства *Bureau Veritas*, щодо оцінки пружних характеристик композиційного матеріалу за властивостями його компонентів.
2. За допомогою отриманої математичної моделі, удосконалено метод розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, що дало змогу врахувати конструктивно-технологічні фактори виготовлення із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волоконном (або стрічкою).
3. Отримано закономірності впливу на напружено-деформований стан намотаного тороїдального міцного корпусу схем армування, геометричних параметрів корпусу, перспективних типів армуючих наповнювачів та сполучників, змінної товщини та її осереднення. Встановлено, що неврахування конструктивно-технологічних факторів виготовлення способом намотування та особливостей розрахунку властивостей композиційних матеріалів і використання спрощених методів розрахунку призводить до заменшення напружень в два рази та виникненню помилки в небезпечну сторону.
4. Отримав подальший розвиток метод розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, з урахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення способом намотування із полімерних композиційних матеріалів

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

1. Розроблено алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану і оцінку міцність корпусу підводного апарату тороїдальної форми з урахуванням конструктивно-технологічних факторів при виготовленні способом намотування із полімерних композиційних матеріалів.
 2. Отримані результати та рекомендації можуть бути використанні на етапі розробки техніко-економічного обґрунтування перспективних підводних апаратів з тороїдальним міцним корпусом на початкових стадіях проектування.
- Практичне застосування результатів досліджень відображено у наступному: «Методика розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з урахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення його із ПКМ способом намотування волоконном» (№УКФА. 362111.002.М. НУК ім. адм. Макарова, 2020. 17 с).
- Впровадження результатів. Результати наукових розробок впроваджено в навчальний процес підготовки бакалаврів та магістрів кораблебудівного навчально-наукового інституту за спеціальностями 135 – «Суднобудування» та 134 – «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» (акт від 02.03.2020).
- Розроблена в роботі методика впроваджена в ДП «Миколаївський суднобудівний завод» (акт від 12.03.2020) м. Миколаєва для оцінки міцності корпусів підводних апаратів тороїдальної форми на початкових стадіях проектування та може в подальшому бути використана при проектуванні підводно-технічних систем і комплексів на інших підприємствах, що проектують підводні апарати.

Рисунок 2.1 – Структурно-логічна схема виконання дисертаційного дослідження

2.2 Методи виконання досліджень

При проведенні дисертаційного дослідження було використано наступні загальнонаукові методи.

При вирішенні пошукової задачі дослідження напружено-деформованого стану тороїдальної оболонки використано аналітичний метод випадкового ненаправленого пошуку, який полягає в створенні математичного опису напружено-деформованого стану.

При визначенні пружних характеристик полімерних композиційних матеріалів використовувались теоретичний метод оцінки за Фойхтом і Рейсом та практичні рекомендації класифікаційного співтовариства Bureau Veritas (Франція).

При визначенні напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу використані положення будівельної механіки корабля, теорії пружності та теорії тонкостінних оболонок.

Метод нелінійного математичного програмування – для формування математичної моделі напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу.

Метод Бубнова-Гальоркіна – при розв’язанні систем лінійних диференціальних рівнянь для визначення переміщень в системі рівнянь рівноваги.

Оцінка ефективності розроблених конструктивно-технологічних рішень для тороїдального міцного корпусу до детального опрацювання всього проекту оцінюється за наступним критерієм: відношення маси міцного корпусу до його водотоннажності $m_{МК}/m_w$, що забезпечує плавучість. Вимога мінімальної ваги дуже важлива для міцного корпусу в підводних конструкціях.

2.3 Конструктивно-технологічний аналіз методів намотування тороїдальних міцних корпусів

Потенційні можливості проектування та виготовлення методом безперервного намотування тороїдальних міцних корпусів, що знаходяться під дією гідростатичного тиску, випливають з досліджень в області намотування конструкцій контейнерів в формі тору для зберігання та подачі газу, що знаходяться під дією внутрішнього тиску [50-59], а також різних криволінійних трубопроводів, що мають циліндричні та тороїдальні ділянки [60-61].

Метод безперервного намотування волокном або стрічкою тороїда відрізняється більшими можливостями, однак, не дозволяє реалізувати будь-які, в тому числі і достатньо ефективні, схеми армування, тобто має обмеження, котрі повинні бути враховані в процесі проектування тороїдального міцного корпусу. [50]

Відповідно до [50], при виготовленні тороїдальної оболонки методом безперервного намотування волокном або армуючої стрічки на оправку можливо реалізувати наступні технологічні схеми армування: перехресне спіральне армування (геодезичне, рівноважне), поперечне намотування в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) та комбіноване намотування (коли шари, викладені перехресно-спіральним намотуванням підсилені поперечними шарами).

Оправка для тороїдального міцного корпусу може бути виготовлена із розчинних або плавких матеріалів та може бути розбірною. Для намотування тороїдальних посудин тиску використовують в основному пісчано-полімерні вимиваємі оправки. [50]

2.3.1 Метод поперечного намотування в комбінації з повздовжнім намотуванням (викладкою)

На тороїдальних оболонках методом спільного намотування може бути реалізовано поперечне намотування в комбінації з повздовжнім намотуванням

(або викладкою) [50] (рис. 2.2). Згідно з тверджень авторів [50] одночасне формування повздовжнього та поперечного шарів зменшує час, що витрачається на процес намотування композитної оболонки, в порівнянні зі спіральним намотуванням.

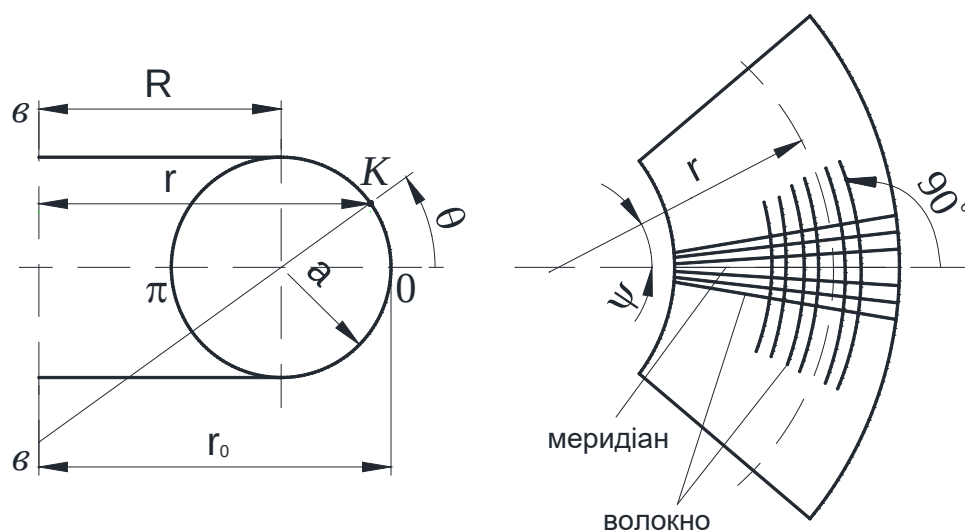


Рисунок 2.2 – Геометричні розміри та схеми намотування кругової тороїдальної оболонки виконаної поперечним намотуванням в комбінації з поздовжнім намотуванням (або викладкою):

a – внутрішній радіус перерізу меридіана; R – відстань від вісі обертання до центру меридіанного перерізу; r_0 – максимальний радіус обертання (на зовнішньому екваторі); r – відстань від вісі обертання $v-v$ до деякої точки $K(\theta)$ серединної поверхні у меридіанному перерізі

В роботі [62] описано виготовлення намотаних тороїдальних посудин тиску, де в якості оправки використовується тороїдальна оболонка зібрана з чотирьох елементів, які отримано окремо повздовжнім намотуванням і викладкою, і які залишаються в складі конструкції (рис. 2.3).

При намотуванні тороїдальної оболонки методом поперечного намотування в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) отриманий композиційний шар матеріалу буде складатись із $2l_1$ шарів, що чергуються, із яких повздовжні моношари намотуються під кутом $\varphi=90^\circ$ до

горизонтальної вісі, а поперечні шари – під кутом $\varphi=0^\circ$ з можливим наступним підсиленням в поперечному напрямку кількістю моношарів l_2 .

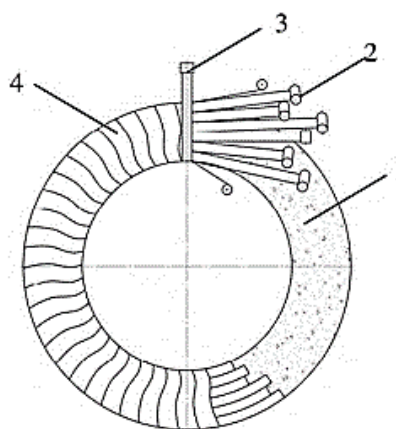


Рисунок 2.3 – Технологічна схема виготовлення кругової тороїдальної оболонки методом поперечного намотування в комбінації з повздожнім намотуванням (або викладкою):

1 – оправка; 2 – котушка повздожніх стрічок; 3 – котушка поперечних стрічок; 4 - оболонка

При розгляді структури стінки намотаної кругової тороїдальної оболонки моношаром вважається один шар полімерного композиційного матеріалу, сформований односпрямованим матеріалом (стрічкою) при намотуванні (викладці) одного циклу на замкнену тороїдальну оболонку.

Повздожній моношар має постійну товщину по всьому перерізу тороїдальної оболонки:

$$h_{\text{повзд}} = h_2 = \text{const}$$

де $h_2=\text{const}$ – товщина односпрямованого КМ (армуючої стрічки).

При поперечному намотуванні в комбінації з повздожнім намотуванням (або викладкою) поперечний моношар, викладений вздовж меридіану буде мати

змінну товщину за рахунок більш щільного укладання волокон на внутрішньому екваторі оболонки ($0 \leq k = a/R \leq 0,5$) [51]:

$$h_{\pi}(\theta, k) = h_2 \frac{1+k}{1+k \cos \theta} \quad (2.1)$$

При однаковому матеріалі всіх моношарів маса тороїдального корпусу, виконаного безперервним намотуванням залежить від структури композиційного матеріалу, тобто від кількості шарів, від кутів їх армування та геометрії тороїдальної оболонки, при цьому – формується структура зі змінною товщиною вздовж меридіану.

2.3.2 Спіральний метод намотування

Спіральне намотування (рис. 2.4) – симетричне укладання волокна (стрічки), при якому стінка багат шарового матеріалу формується парами однакових моношарів (односпрямованих композиційних матеріалів), що викладаються під кутами $\pm\varphi$ до меридіану. В залежності від схеми намотування, розрізняють рівноважне спіральне намотування (РСН) та геодезичне спіральне намотування (ГСН). [63, 64]

Авторами робіт [50, 54] оцінено вплив технологічних факторів процесу намотування на конструктивну досконалість кругових тороїдальних оболонок, що використовуються в якості посудин високого тиску для зберігання та транспортування рідких і газоподібних продуктів, та визначено теоретично конструктивно-технологічні обмеження, що пов'язані з намотуванням кругових тороїдальних оболонок, а також експериментально визначено точність виконання кутів намотування волокон на тороїдальну оправку.

Аналіз результатів проведених авторами [50, 54] експериментів показує, що у випадку намотування з зісковзуванням рівноважна крива прагне до положення геодезичної лінії на поверхні тору. Окрім того, намотування за

$$h_{SG}(\theta, k) = h_2 \frac{(1+k) \cos \varphi_0}{(1+k \cos \theta) \cos \varphi_G} = h_2 \frac{(1+k) \cos \varphi_0}{\sqrt{(1+k \cos \theta)^2 - (1+k)^2 \sin \varphi_0}}, \quad (2.2)$$

де φ_0 – початковий кут армування на максимальному радіусі (екваторі) тороїдальної оболонки при $r=r_0=R+a$ (т.К, рис.2.4):

$$\varphi_0 = \arcsin \left[\frac{1-k}{\sqrt{3+5k^2}} \right]. \quad (2.3)$$

Дана формула справедлива у всьому діапазоні значень $0,05 < k < 0,5$ та дозволяє отримати значення кута φ_0 з точністю до 1% [54].

При рівноважній схемі намотування закон розподілення товщини моношару по меридіану ($0 \leq k \leq 0,25$) [54]:

$$h_{SR}(\theta, k) = h_2 \frac{(1+k) \cos \varphi_0}{(1+k \cos \theta) \cos \varphi_R} = h_2 \frac{(1+k) \sqrt{\frac{2+k}{3+2k}}}{(1+k \cos \theta) \sqrt{\frac{2+k \cos \theta}{3+2k \cos \theta}}} \quad (2.4)$$

Відповідно до [54] закони зміни кутів намотування на круговому торі φ_G і φ_R , що входять в (2.2) та (2.4):

- за геодезичною лінією:

$$\varphi_G = \arcsin \left[\frac{1-k^2}{\sqrt{2+k^2}(1+k \cos \theta)} \sqrt{\frac{2}{3}} \right] \quad (2.5)$$

- за рівноважною лінією:

$$\varphi_R = \arctg \sqrt{\frac{1+k \cos \theta}{2+k \cos \theta}} \quad (2.6)$$

В роботах [50, 54], де проаналізовано досвід формоутворення кругових тороїдальних посудин тиску методом намотування волокнистими ПКМ з різними схемами армування, автори вказують на наявність ряду обмежень конструктивно-технологічного характеру: за нерівнонапруженістю волокон; за граничним кутом намотування, за коефіцієнтом тертя у випадку намотування тороїдальних оболонок не за геодезичними лініями поверхні (геодезичне відхилення).

На думку автора [50], геодезичне відхилення (коефіцієнт тертя) при намотуванні волокном на тороїдальну оболонку пов'язане з зісковзуванням волокон з її поверхні у випадку намотування не за геодезичними лініями. Як вказано в [50], можливість намотування без зісковзування визначається коефіцієнтом тертя $f_{тр}$ армуючого наповнювача по поверхні оправки та між шарами матеріалу, значення якого залежить як від натягу волокон при намотуванні, так і: від їх виду, стану сполучника, властивостей матеріалу поверхні оправки, і в кожному окремому випадку визначається експериментально. Максимальне значення кута геодезичного відхилення зменшується при $k \rightarrow 0$ [50].

При створенні конструкцій з односпрямованих ПКМ, як відомо з [52], максимально допустимі кути тертя при намотуванні знаходяться в межах $12...15^\circ$ ($f_{тр}^{Доп} = 0,2...0,28$). Ця обставина обмежує можливість виготовлення намотуванням за рівноважною кривою кругових тороїдальних оболонок з параметрами $k > 0,2...0,25$ [52].

2.4 Вибір розрахункової моделі структури оболонки композиційного тороїдального міцного корпусу, що виготовлений способом намотуванням

При математичному моделюванні поведінки під навантаженням оболонкових конструкцій із волокнистих ПКМ необхідно враховувати фізико-механічні властивості матеріалів, геометрію та товщину оболонки, а також анізотропію і склад структури ПКМ.

При створенні тороїдальних міцних корпусів із композитів конструкторські та технологічні питання не можуть розглядатись окремо, як це можливо з конструкціями з металів [54]. Формування структури стінки ПКМ обумовлено технологічними можливостями формоутворення оболонкової конструкції.

Тому, розрахункова схема оболонки суттєвим чином залежить від прийнятої моделі структури матеріалу. А оскільки метод намотування забезпечує широкий вибір армуючого наповнювача та полімерних сполучників, прийнята модель повинна це враховувати.

В залежності від технологічної схеми намотування тороїдальної оболонки, формується структура з неоднорідними пружними властивостями та властивостями міцності, а від пружних властивостей композиційного матеріалу залежать значення величини напружень при розв'язанні задач міцності.

ПКМ проникні для води при високому тиску. Оболонкові конструкції із них, що працюють при високому внутрішньому або зовнішньому тиску, потребують герметизації. Герметичність посудини тиску може бути забезпечена підвищенням монолітності ПКМ [65] або використанням герметизуючого шару. Дуже тонкий герметичний шар (лейнер) може бути металевим (сталь, алюмінієві сплави) або полімерним (термопластичні ПКМ: поліетилен, поліамід та ін.). [66, 67]

Однак, в літературі є описання міцних корпусів, при виготовлені яких лейнер не використовувався. Згідно [68] при виготовлені циліндричного

міцного корпусу методом намотування для безлюдного підводного апарату AUSS з робочою глибиною занурення 6000 м герметизуючий шар не використовувався, а була реалізована технологічна монолітність, оскільки метод намотування забезпечує високий рівень якості матеріалу корпусу. Товщина стінки намотаного міцного корпусу апарату AUSS – $h = 63,5$ мм, $\Delta = h/a = 0,194$.

Вплив герметизуючого шару на несучу здатність тороїдальної оболонки із ПКМ через його малу товщину в даній роботі не враховується.

В роботі намотаний тороїдальний міцний корпус через особливості технології виготовлення розглядається як шарувата ортотропна оболонка зі змінною товщиною стінки вздовж меридіану, яка збільшується від зовнішнього екватора до внутрішнього. Розрахунок пружних характеристик матеріалу стінки намотаних тороїдальних оболонок проводиться шляхом приведення їх реальної структури до шаруватої моделі [69-72], котра складається із моношарів фіксованої товщини. Таку структуру для математичного моделювання задач оптимізації конструкцій із волокнистих ПКМ називають дискретною, а сукупність цих прийнятих положень – дискретно-структурною теорією. При цьому, розглядаються односпрямовано армовані композиційні матеріали (моношари), волокна яких є пружними ізотропними (скловолокно), пружними монотропними (вуглеволокно) матеріалами, а сполучник є ізотропним матеріалом, що має в'язкопружні властивості (наприклад, епоксидний сполучник).

Другим важливим аспектом моделювання структури стінки із композиційних матеріалів є те, що її товщина повинна бути кратною товщині моношару напівфабрикату (армуючої стрічки), а для структур композиційного матеріалу $[\pm\varphi]$ – товщина повинна бути кратною парному числу моношарів.

На основі дискретно-структурної теорії прийнято розрахункову модель структури ортотропного КМ [85], яка враховує закони розподілу товщин моношарів вздовж меридіану при поперечному намотуванні в комбінації з повздовжньою намоткою (або викладкою) та перехресному спіральному

намотуванні, описаних М.А. Комковим при дослідженні конструктивно-технологічних особливостей намотування тороїдальних балонів тиску кругового поперечного перерізу. Причому, головні вісі ортотропії співпадають з напрямком головних кривизн поверхні тору.

Шарувата стінка складається із « i » ($1 \leq i \leq n$) моношарів змінної товщини, що чергуються. Такі шари мають властивості армуючого матеріалу та сполучника. При розробці дискретних розрахункових моделей структури стінки намотаного тороїдального міцного корпусу зі змінною товщиною в якості проектних параметрів, що описують порядок чергування моношарів, взяті товщина повздовжнього моношару $h_2 = \text{const}$ та кількість моношарів, які вкладаються в кожному із напрямків армування.

2.5 Порівняння методів оцінки ефективних пружних характеристик матеріалу тороїдального міцного корпусу підводного засобу, що виготовлений намотуванням волокном (стрічкою)

Досліджується розподіл ефективних модулів пружності E_θ , E_ψ багатошарового ортотропного композиційного матеріалу в меридіанному θ та повздовжньому ψ напрямку, в залежності від методу оцінки пружних характеристик армуючого матеріалу та сполучника.

Порядок розташування моношарів в пакеті багатошарового матеріалу не має значення при підрахунку його жорсткості. Загальна кількість шарів l_Σ в пакеті визначається як сума моношарів, укладених з однаковими кутами φ , наприклад, $l_\Sigma = l_0 + l_{90} + l_\varphi$, де l_{90} – кількість моношарів, укладених під кутом 90° , l_0 – кількість шарів, укладених під кутом 0° , l_φ – кількість шарів, укладених під кутами $\pm\varphi$.

Ефективні пружні постійні E_θ , E_ψ ортотропного ПКМ визначаються за формулами [64]:

$$E_{\psi} = B_{\psi\psi} - \frac{B_{\psi\theta}^2}{B_{\theta\theta}}; \quad E_{\theta} = B_{\theta\theta} - \frac{B_{\psi\theta}^2}{B_{\psi\psi}}, \quad (2.7)$$

де $B_{jf} = \sum_{i=1}^t B_{jf}^i \bar{h}_i(\theta, k)$;

$\bar{h}_i(\theta, k) = \frac{h_i}{h_{\Sigma}}$ – відносна товщина i -го шару;

h_{Σ} – загальна товщина пакету шарів;

$h_i = h_i^M \cdot l_{\phi i}$ – товщина i -го шару;

h_i^M – товщина моношару;

$l_{\phi i}$ – кількість моношарів в шарі, покладеному в напрямку армування ϕ_i ;

t – загальна кількість шарів в пакеті, що покладені в напрямку армування ϕ_i .

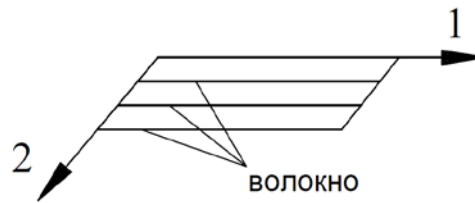


Рисунок 2.5 – Системи координат моношару в вісях армування

Модулі пружності моношарів пакету залежать від жорсткісних характеристик шарів певної орієнтації і від співвідношення товщини цих шарів в загальній товщині пакету. Жорсткісні характеристики i -го моношару в системі координат тороїдальної оболонки θ, ψ (рис. 2.5) при довільному розташуванні армуючих елементів знаходяться на основі відомих геометричних співвідношень, що визначають перетворення пружних постійних при повороті вісей координат [73]:

$$\begin{aligned} B_{\theta\theta}^i &= \bar{E}_1^i \sin^4 \phi_i + 2\bar{E}_3^i \sin^2 \phi_i \cos^2 \phi_i + \bar{E}_2^i \cos^4 \phi_i; \\ B_{\psi\psi}^i &= \bar{E}_1^i \cos^4 \phi_i + 2\bar{E}_3^i \sin^2 \phi_i \cos^2 \phi_i + \bar{E}_2^i \sin^4 \phi_i; \\ B_{\psi\theta}^i &= \bar{E}_1^i \mu_{21} (\sin^4 \phi_i + \cos^4 \phi_i) + (\bar{E}_1^i + \bar{E}_2^i - 4G_{12}) \sin^2 \phi_i \cos^2 \phi_i; \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$B_{ss}^i = G_{12} + (\bar{E}_1^i + \bar{E}_2^i - 2\bar{E}_3^i) \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i;$$

$$\bar{E}_1 = \frac{E_{1ш}}{1 - \mu_{21}\mu_{12}}; \bar{E}_2 = \frac{E_{2ш}}{1 - \mu_{21}\mu_{12}}; \bar{E}_3 = 2G_{12ш} + \bar{E}_1\mu_{21}.$$

Пружні характеристики односпрямованого армуючого шару (моношару) $E_{1ш}$, $E_{2ш}$, (в напрямку вздовж (індекс 1) та поперек (індекс 2) армування відповідно) та μ_{21} розраховуються з використанням феноменологічного підходу до визначення пружних постійних шару, ґрунтованого на розрахунково-експериментальних методах [73], або розраховуються за властивостями компонентів, з використанням теоретичної моделі оцінки за Фойхтом і Рейсом [72]. При використанні феноменологічного підходу стає можливим врахування таких, важко підлягаючих розрахунку технологічних факторів, як: натяг стрічки при намотуванні, тиск пресування, режим полімеризації та інші параметри, що впливають на механічні властивості композиту після отвердіння [73]. Залежності теоретичної моделі для ефективних пружних характеристик моношару дають, в кінцевому варіанті, задовільну для практичних розрахунків точність, особливо, якщо врахувати великий розкид експериментальних даних і високу чутливість цих даних до технологічних факторів (наприклад, до викривлення волокна, неідеальній адгезії і т.д.) [72]:

$$\begin{aligned} E_{1ш} &= E_B \eta + (1 - \eta) E_M; E_{2ш} = \frac{E_B E_M}{\eta E_M + (1 - \eta) E_B}; \\ \mu_{12ш} &= \mu_B \eta + (1 - \eta) \mu_M; \mu_{21ш} = \frac{\mu_{12} E_{2ш}}{E_{1ш}}; \\ G_{12ш} &= \frac{G_B G_M}{\eta G_M + (1 - \eta) G_B}; G_B = \frac{E_B}{2(1 + \mu_B)}; G_M = \frac{E_M}{2(1 + \mu_M)}, \end{aligned} \quad (2.9)$$

де η – відносний об’ємний вміст армуючого матеріалу;
 E_M (E_B) – модуль пружності сполучника (волокна), МПа;
 μ_M (μ_B) – коефіцієнт Пуассона сполучника (волокна);
 G_M (G_B) – модуль зсуву сполучника (волокна), МПа.

Буквенні індекси В та М в формулах вказують на приналежність до волокна і матриці відповідно.

Класифікаційне товариство *Bureau Veritas* (Франція) [74-75] теж дає свої практичні поправки до розрахунку ефективних пружних характеристик для корпусів суден із ПКМ:

$$\begin{aligned}
 E_{1ш} &= (E_B \eta + (1-\eta) E_M) C_{UD1}; \\
 E_{2ш} &= C_{UD2} \times \left(\left(\frac{E_M}{1-\mu_M^2} \right) \times \frac{1+0,85 \times \eta^2}{(1-\eta)^{1,25} + \frac{E_M \times \eta}{E_{B90} (1-\mu_M^2)}} \right); \\
 G_{12ш} &= C_{UD12} \times G_M \times \frac{1+\eta \times \alpha}{1-\eta \times \alpha}; \\
 \alpha &= \frac{\left(\frac{G_B}{G_M} \right)^{-1}}{\left(\frac{G_B}{G_M} \right)^{-1} + 1}; \\
 \mu_{12ш} &= C_{UDv} \times (\mu_B \times \eta + \mu_M \times (1-\eta)); \\
 \mu_{21ш} &= \mu_{12ш} \times \frac{E_{2ш}}{E_{1ш}},
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

де E_{B90} – поперечний модуль пружності волокна, МПа.

Значення коефіцієнтів C_{UD1} , C_{UD2} , C_{UD12} і C_{UDv} , що враховують особливості поверхонь армуючих волокон і їх взаємодію з матрицею, залежать від типу волокна (таблиця 1).

Таблиця 2.1 – Значення коефіцієнтів C_{UD1} , C_{UD2} , C_{UD12} і C_{UDv} для волокон [74].

	Е-скло	Р-скло	Вуглець HS	Вуглець IM	Вуглець HM
C_{UD1}	1	0,9	1	0,85	0,9
C_{UD2}	0,8	1,2	0,7	0,8	0,85
C_{UD12}	0,9	1,2	0,9	0,9	1
C_{UDv}	0,9	0,9	0,8	0,75	0,7

В якості прикладу, для аналізу пружних характеристик розглянуто намотані тороїдальні оболонки міцного корпусу зі скляних та вуглецевих

волокон на епоксидному сполучнику, так як – композиційні матеріали на їх основі мають високу міцність при стисканні та зсуві.

Армуючий наповнювач для композиційних матеріалів, з яких необхідно спроектувати міцний корпус підводного технічного засобу, конструкції, повинен поєднувати високу міцність та модуль пружності. Найбільш відомими виробниками високомодульних високоміцних вуглецевих волокон на основі ПАН-волокон є компанії *Toray* (Японія, торгова марка TORAYCA®) [76], *TohoTenax* (Японія) [77], *Nippon Graphite Fiber Corporation* (Японія) [78], *Cytec* (США) [79], *Mitsubishi* (Японія, торгова марка DIALEAD®) [80], *Hexcel* (США, торгова марка HexTow®) [81].

Вуглецеві волокна мають самий широкий діапазон міцності та жорсткості, ніж всі інші волокна, що використовуються в армованих композиційних матеріалах. Асоціацією виробників вуглецевих волокон Японії (*Japan Carbon Fiber Manufacturers Association (JCMA)*) запропонована така класифікація вуглецевих волокон (за значенням модуля пружності): низькомодульні ($E_{\text{ВВ}} = 40 \dots 200$ ГПа), середні по модулю ($E_{\text{ВВ}} = 270 \dots 325$ ГПа), високомодульні ($E_{\text{ВВ}} = 325 \dots 440$ ГПа) та зверхвисокомодульні ($E_{\text{ВВ}} = 440 \dots$ ГПа) [82]. Ця класифікація не відноситься до стандарту по методиці випробувань, тому – значення модуля пружності для кожного класу від різних виробників можуть відрізнятись від вказаних границь в кожному класі [82]. Міцність на розтягування високомодульних та зверхвисокомодульних волокон однакові або нижчі міцності середніх за модулем вуглецевих волокон. Міцність на стискання високомодульних вуглецевих волокон складає 1,7 ГПа, зверхвисокомодульних – 0,5 ГПа [83].

Взяті для розрахунку властивості армуючих наповнювачів $E_{\text{В}}$ та сполучника $E_{\text{М}}$, рекомендовані виробником для отримання намотаних конструкцій із ПКМ, вказані в таблиці 2.2. Відносний об'ємний вміст волокон прийнято в розрахунках $\eta = 0,6$.

Модулі пружності E_{θ} та E_{ψ} (Рис 2.7 – 2.10) для вуглепластика та склопластика визначені в різних діапазонах зміни співвідношення k , в

залежності від технологічної схеми намотування тороїдальної оболонки та моделей розрахунку пружних характеристик моношару: для поперечного намотування в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) – $0 \leq k \leq 0,5$; спірально-геодезичного намотування – $0 \leq k \leq 0,45$; рівноважного спірального намотування – $0 \leq k \leq 0,25$ [54, 85-87].

Вибір таких границь параметру k , що характеризує геометрію тороїдальної оболонки, обумовлено особливостями виготовлення даних оболонок методом намотування волокном та конструктивно-технологічними обмеженнями, такими як: граничні кути намотування, при перевищенні яких волокна перестають доторкатись поверхні оправки на її внутрішній стороні ($90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$), і допустимі кути тертя при намотуванні. Це забезпечує відповідність розрахункової схеми та реального технологічного процесу виготовлення міцного тороїдального корпусу.

Таблиця 2.2 – Властивості армованих наповнювачів та сполучника, що використовуються в розрахунках

Марка компоненту	Модуль пружності, ГПа	Коефіцієнт Пуассона	Міцність при розтягуванні, ГПа
Високомодульне та високоміцне волокно із S-скла ВМПС (ОАО «НПО Стеклопластик») [84]	93	0,32	4,5 – 4,75
Вуглецеве високомодульне волокно M35J (TORAYCA®) [76]	343	0,31	4,7
Вуглецеве високоміцне волокно Hex Tow® [81]	303	0,31	6,964
Вуглецеве зверхвисокомодульне волокно CN-90 (Nippon Graphite Fiber Corporation) [78]	860	0,31	3,43
Епоксидна смола ЕДТ-20 [50]	3	0,32	0,07

Аналіз отриманих результатів показує, що використання традиційної теоретичної моделі оцінки за Фойхтом і Рейсом призводить до перебільшення пружних характеристик моношару, в порівнянні з використанням практичних рекомендацій класифікаційного товариства *Bureau Veritas* [74], для ВП на 20%, а для СП розбіжність складає 5,6%, що призводить до виникнення помилки в небезпечну сторону. Тому далі розрахунки проводяться з урахуванням практичних рекомендацій класифікаційного товариства *Bureau Veritas* для розрахунку пружних характеристик ПКМ.

На рис. 2.6-2.9 представлено залежності модуля пружності E_θ та E_ψ від параметра k .

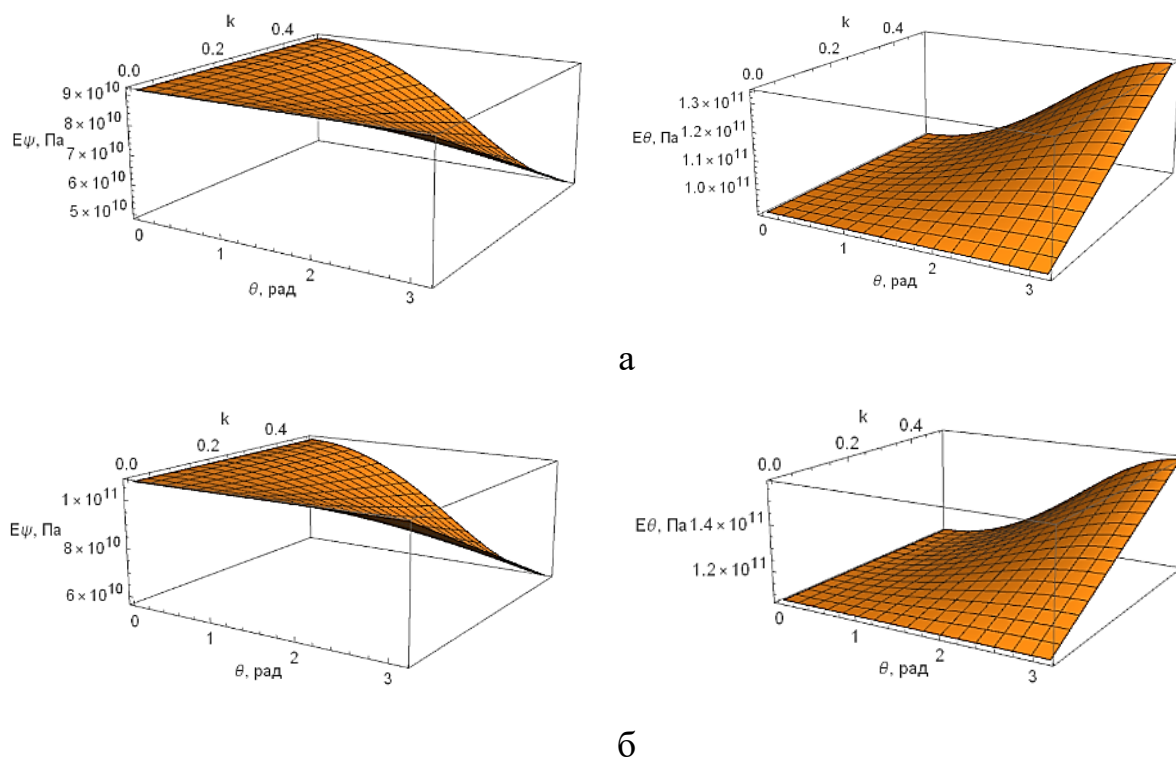


Рисунок 2.6 – Залежність модуля пружності E_θ та E_ψ ВП М35J/ЕДТ-20, виготовленого поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням волокном, від параметра k вздовж меридіану та кута θ : а – *Bureau Veritas*; б – теоретична модель оцінки за Фойхтом і Рейсом

Розрахункові пружні властивості E_θ , E_ψ склопластикового та вуглепластикового міцного корпусу тороїдальної форми, виготовлених поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою), відрізняються між собою, однак поверхні розподілу властивостей за меридіаном тороїдальної оболонки схожі між собою.

Встановлено, що зі збільшенням параметра k та наближенням до внутрішнього екватору тороїдальної оболонки модуль пружності E_θ збільшується за рахунок збільшення товщини в цій зоні, а E_ψ , навпаки, зменшується, оскільки частина повздовжніх шарів в загальній товщині стінки оболонки зменшується.

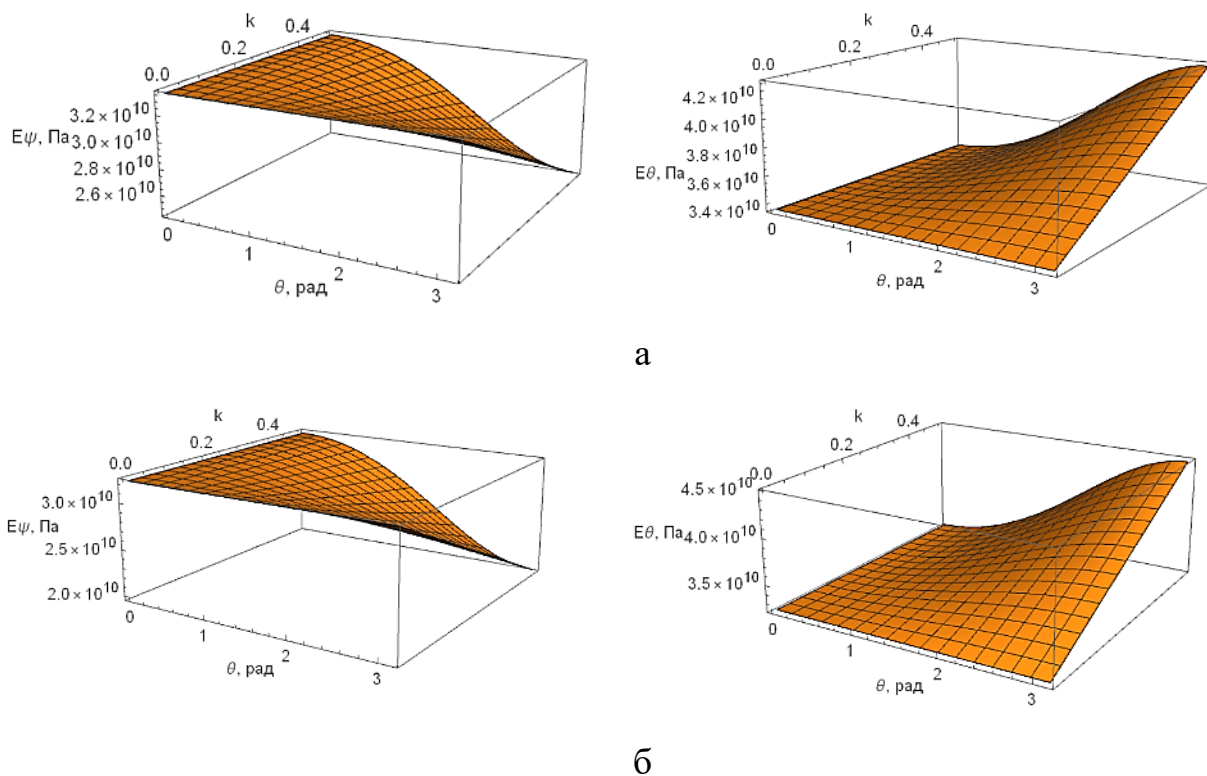


Рисунок 2.7 – Залежність модуля пружності E_θ та E_ψ

СП S-2 GLASS/ЕДТ-20, виготовленого поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням волокном, від параметра k вздовж меридіану та кута θ :

а – Bureau Veritas; *б* – теоретична модель оцінки за Фойхтом і Рейсом

Для оболонок, виготовлених перехресним спіральним намотуванням, траєкторія викладання волокон – геодезична або рівноважна – впливає на діапазон зміни пружних характеристик, і це потрібно враховувати при виборі технологічної схеми намотування з врахуванням умов навантаження тороїдальної оболонки.

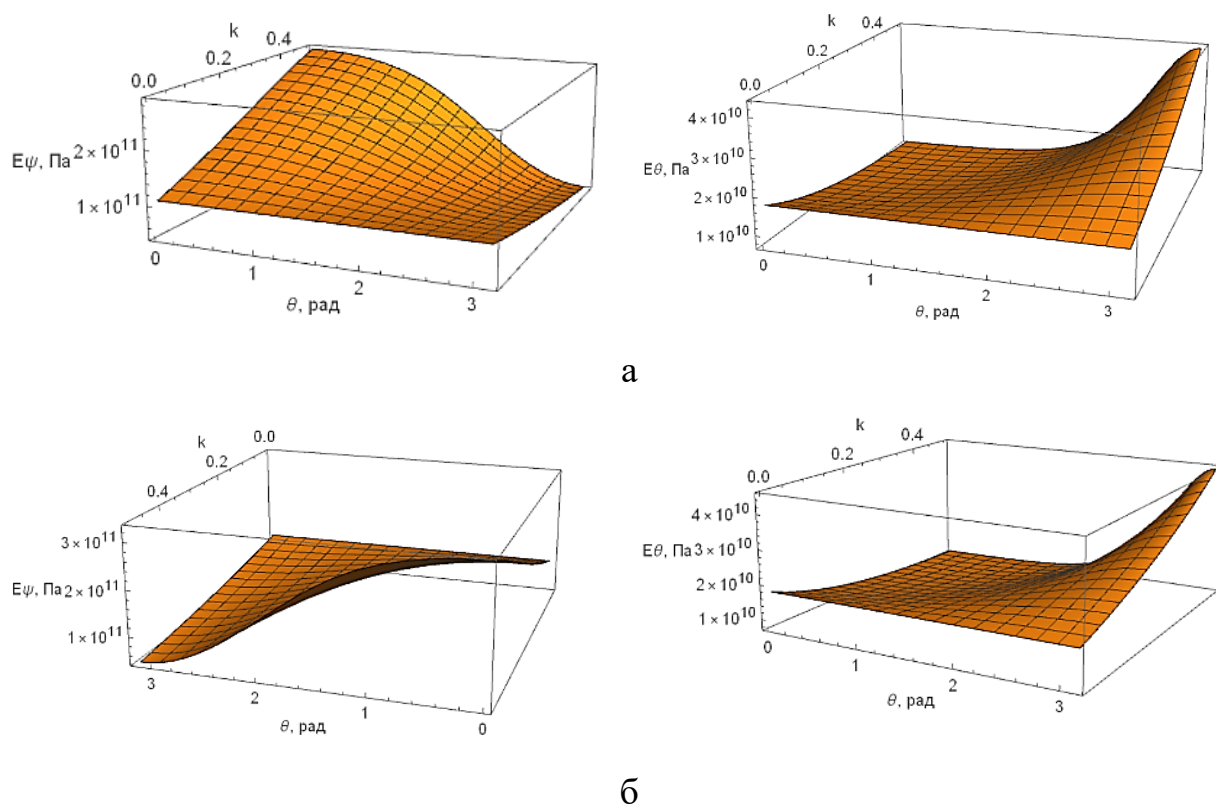
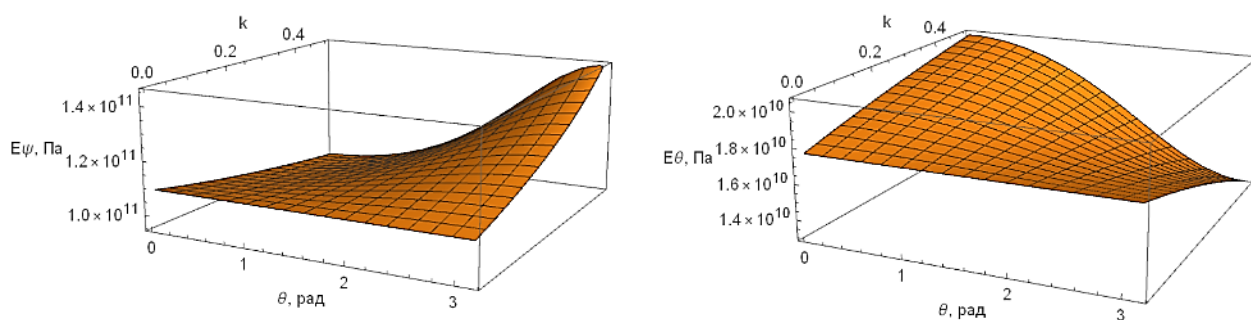


Рисунок 2.8 – Залежність модуля пружності E_θ та E_ψ ВП М35J/ЕДТ-20, виконаного геодезичним спіральним намотуванням, від параметра k вздовж меридіану та кута θ :

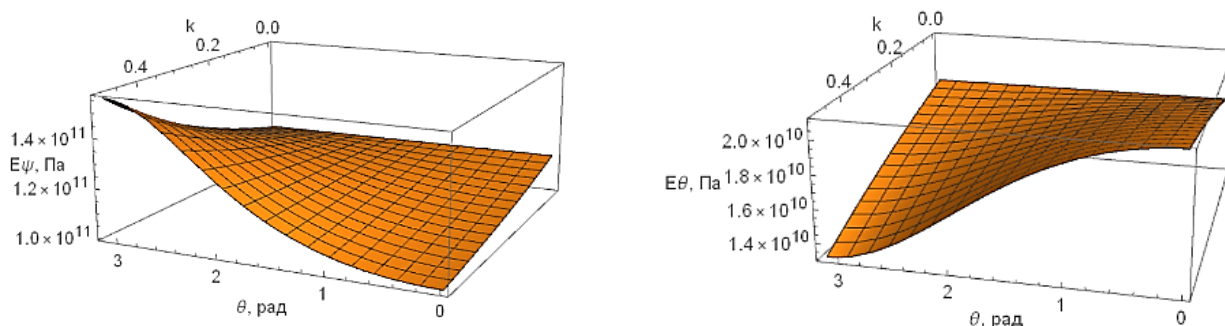
а – Bureau Veritas; *б* – теоретична модель оцінки за Фойхтом і Рейсом

На рис. 2.10 показано залежності модулів пружності E_θ/E_ψ при використанні практичної моделі Bureau Veritas (*а*) та теоретичної моделі оцінки за Фойхтом і Рейсом (*б*) для міцного корпусу з ВП М35J/ЕДТ-20, виготовленого поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) і спіральним геодезичним намотуванням, в

області $\theta = 90^\circ$ та на зовнішньому ($\theta = 0^\circ$) і внутрішньому екваторах ($\theta = 180^\circ$) тороїдального міцного корпусу.



а



б

Рисунок 2.9 – Залежність модуля пружності E_θ та E_ψ ВП М35J/ЕДТ-20, виконаного рівноважним спіральним намотуванням, від параметра k вздовж меридіану та кута θ :

a – Bureau Veritas; *б* – теоретична модель оцінки за Фойхтом і Рейсом

Проведений числовий аналіз дозволив визначити діапазон та інтенсивність зміни пружних характеристик намотаних тороїдальних оболонок зі змінною товщиною стінки, які потрібно враховувати при розв'язанні задачі напружено-деформованого стану намотаних тороїдальних міцних корпусів.

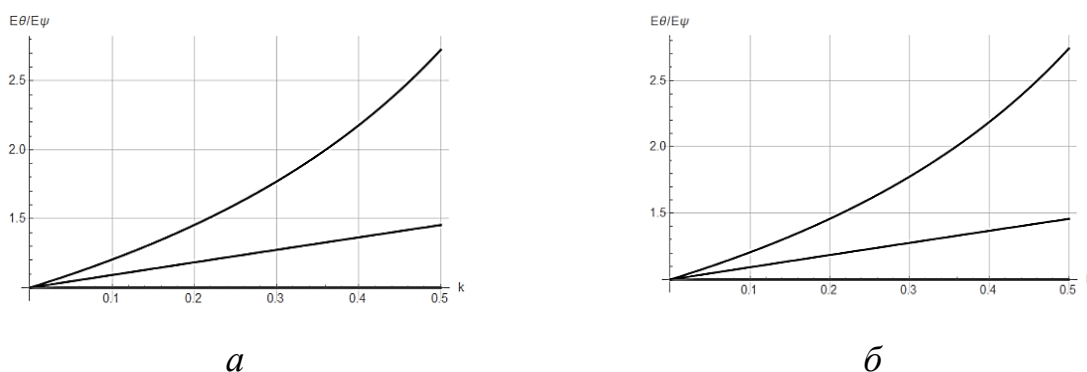


Рисунок 2.10 – Залежність відношення модулів пружності E_{θ}/E_{ψ} ВП М35J/ЕДТ-20, отриманих поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) волокном від $0 \leq k \leq 0,5$ в області та кута $\theta = 90^{\circ}$ та на зовнішньому ($\theta = 0^{\circ}$) і внутрішньому екваторах ($\theta = 180^{\circ}$):

а – Bureau Veritas; *б* – теоретична модель оцінки за Фойхтом і Рейсом

2.6 Прикладні програми, що використовувались у дослідженнях

Для автоматизації обчислень, знаходження НДС тороїдального міцного корпусу, побудови графіків та розв’язання інших задач в дисертаційній роботі застосовувались відомі програмні продукти, перелік та короткий опис яких представлено нижче.

FreeCAD – некомерційна система автоматизованого проектування загального призначення з відкритим кодом. *FreeCAD* була створена в першу чергу для роботи у сфері машинобудування та промисловості. Вона має схожі інструменти з системами *CATIA*, *SolidWorks* або *Solid Edge*. Інформацію про програмний продукт, останню його версію та інструкції до застосування можна знайти у джерелі [88]. Система застосовувалась у дисертаційному дослідженні для побудови епюр.

Maxima – некомерційний математичний пакет, який має широкий набір засобів для проведення аналітичних розрахунків, числових розрахунків та побудови графіків [89]. *Maxima* застосовується у дисертаційному дослідженні для автоматизації розрахунків, розв’язання системи диференціальних рівнянь, побудови графіків функцій.

Apache OpenOffice – некомерційний офісний пакет, сумісний з Microsoft Office. Його засоби застосовувались для підготовки тексту дисертаційної роботи та для побудови графіків функцій за сукупністю точок, визначених за допомогою розрахунків або чисельних експериментів. Більш докладна інформація про програмний продукт та його остання версія доступні за джерелом [90].

2.7 Висновки за розділом 2

1. У розділі 2 виконано обґрунтування теми дисертаційного дослідження та сформульовано основні задачі дослідження
2. Для виконання дисертаційного дослідження використовувались наступні методи: аналітичний метод випадкового ненаправленого пошуку; теоретичний метод оцінки за Фойхтом і Рейсом та практичні рекомендації класифікаційного товариства Bureau Veritas для пружних характеристик ПКМ; положення будівельної механіки корабля, теорії пружності та теорії тонкостінних оболонок; метод лінійного математичного програмування; метод Бубнова-Гальоркіна.
3. Проведено аналіз впливу теоретичної моделі оцінки пружних характеристик по Фойхту і Рейсу з практичними рекомендаціями спільноти Bureau Veritas. Результати аналізу показали, що використання традиційної теоретичної моделі оцінки по Фойхту і Рейсу призводить до збільшення пружних характеристик шару в порівнянні з використанням практичних рекомендацій класифікаційного товариства Bureau Veritas для ВП на 20%, а для СП розбіжність складає 5,6%, що призводить до виникнення помилки в небезпечну сторону.
4. Встановлено, що зі збільшенням параметра k та наближенням до внутрішнього екватору тороїдальної оболонки модуль пружності E_θ збільшується за рахунок збільшення товщини в цій зоні, а E_ψ , навпаки, зменшується, оскільки частина повздовжніх шарів в загальній товщині стінки оболонки зменшується.

5. У дисертаційній роботі застосовувались наступні прикладні програми: FreeCAD, Maxima – для виконання досліджень; Apache OpenOffice – для оформлення результатів.

Результати даного розділу опубліковано в роботах [91-94].

3. НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТОРОЇДАЛЬНОГО МІЦНОГО КОРПУСУ, ВИГОТОВЛЕНОГО НАМОТУВАННЯМ, ПРИ ГІДРОСТАТИЧНОМУ СТИСКАННІ

3.1 Підходи та особливості розрахунку намотаних тонкостінних композиційних конструкцій

Особливість, що виникає при проектуванні конструкцій із ПКМ, пов'язана з тим, що властивості композиційного матеріалу залежать від численних поєднань структурних параметрів, і це ускладнює методи розрахунку несучої здатності композитних конструкцій. Тобто, існує необхідність в розробці відповідних методів розрахунку композитних оболонкових конструкцій з метою оптимізації структури шаруватого матеріалу, які б враховували анізотропні та інші властивості композиційних матеріалів та, дозволяли б, створювати міцні конструкції мінімальної маси.

Перші проведені дослідження в області оптимального проектування конструкцій із композиційних матеріалів відносились до оболонок обертання, розрахованих на внутрішній тиск (камери згорання ракетних двигунів твердого палива, баки, балони тиску: сферичні, циліндричні, тороїдальні та інших форм). [73]

При розрахунку тонкостінних конструкцій із композиційних матеріалів їх деформування описується теоріями багатошарових оболонок, котрі описані в фундаментальних роботах Е.Л. Аксельрада, Н.О. Алфутова [69], В.В. Болотіна [72], Г.А. Ваніна [70], В.З. Власова [95], О.Л. Гольденвейзера, Е.І. Григолюка, А.А. Ільюшина, В.И. Корольова, Х.М. Муштарі, В.В. Новожилова [96], І.Ф. Образцова [73], Ю.Н. Работнова, Ю.В. Немировського, Ю.М. Тарнопольського [64], С.Г. Лехницького [97], С.О. Амбарцумяна [98], В.В. Васильєва [64, 99], К.Ф. Черних [100], В.О. Шаміна [37], А.С. Вольмір [101], Я.С. Карпов [102] та інших. Особливості навантаження, конструкції, структури і властивостей композиційного матеріалу визначають вибір

відповідного варіанту теорії. До робіт, що враховують специфіку створення оболонок, виконаних методом намотування, відносяться роботи А.Н. Єлпатьєвського, В.В. Васильєва, І.Ф. Образцова, В.А. Бунакова, Е.В. Рамана, С.Б. Черевацького.

Особливістю композитної конструкції, виконаної намотуванням, як об'єкта оптимізації, складається з наступного. По-перше, при виготовленні конструкції методом намотування з'являються не лише анізотропні, але і неоднорідні властивості. Однак, в багатьох існуючих методах розрахунку оболонок останній факт не враховується. По-друге, багатошарові КМ складаються з шарів постійної або змінної товщини, що визначає дискретність при моделюванні ряду задач оптимізації структури шаруватого матеріалу.

Сьогодні основа алгоритму розрахунку композитних конструкцій, як аналітичними так і чисельними методами, складається з того, що рівняння рівноваги будуються на наступних структурних рівнях: 1) моношар (армуючий матеріал + сполучник); 2) конструкція (моношар + пакет моношарів (шаруватий матеріал)).

Відсутність розв'язку задачі напружено-деформованого стану намотаної тороїдальної оболонки як міцного корпусу підводних технічних засобів, в якій би враховувались особливості структури ПКМ, обумовлені технологією формування, роблять цю задачу актуальною.

3.2 Вибір основного критерію міцності тороїдального міцного корпусу

Теоретичні методи дослідження несучої здатності оболонок умовно можна поділити на аналітичні та числові. Сьогодні перевірка навантаженої конструкції на міцність або стійкість за допомогою одного із числових методів або за допомогою прикладних програм є інженерною задачею. Аналітичні рішення дозволяють, в подальшому, коректно ставити задачі числового моделювання та аналізувати результати.

Проектування підводних апаратів та човнів базується на сучасній теорії корабля, будівельній механіці та інших суднобудівних дисциплінах. Велике наукове та практичне значення в цих областях мають роботи Суслєва В.П., Качанова Ю.П., Бурдуна Є.Т., Козлякова В.В., Григолюка Є.І., Зайцева В.В., Кравцова В.І., Панфілова Н.О., Коробанова Ю.М., Вольмира А.С., Архангородського А.Г., Коростильова Л.І., Шостака В.П., Кржечковського П.Г., Магули В.Є. та інших. Будівельна механіка підводних човнів базується на досягненнях теорії тонких оболонок, як одного із основних розділів теорії пружності [103].

Для оцінювання міцності застосовуються критерії міцності, що базуються на параметрах міцності індивідуальних шарів. [74]

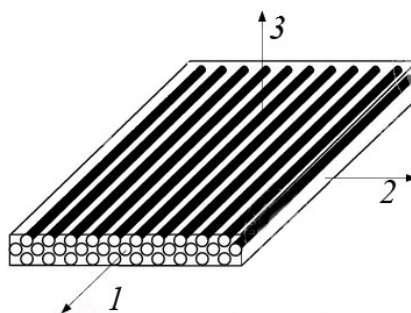


Рисунок 3.1 – Власна система координат моношару

1 – вісь паралельна напрямку волокон (вздовж основи); 2 – перпендикулярна напрямку волокон (поперек основи); 3 – нормальна до площини вісей 1 і 2

Руйнівні напруження у вісях 1–2–3 армування (рис.3.1), що визначені для елементарного шару σ_v або τ_v , розраховані в залежності від типу армування (односпрямовані, тканини, рівниці, мати):

$\sigma_{v1,P}$, $\sigma_{v1,C}$ – теоретичні напруження руйнування, в МПа, відповідно при розтягуванні (індекс Р) й стисканні (індекс С) індивідуального шару в напрямку 1 його місцевої системи координат;

$\sigma_{v2,P}$, $\sigma_{v2,C}$ – теоретичні напруження руйнування відповідно при

розтягуванні й стисканні індивідуального шару в напрямку 2 місцевої системи координат;

τ_{B12} – теоретичні напруження руйнування на зсув в площині симетрії 1–2 індивідуального шару;

τ_{B13}, τ_{B23} – руйнівні напруження міжшарового зсуву.

Руйнівні напруження визначаються, як функція руйнуючих деформацій за законом Гука. Такий підхід оправданий тому, що як окремі компоненти так і композит в цілому, мають практично лінійні діаграми руйнування.

$$\begin{aligned}\sigma_{B1} &= \varepsilon_{B1} \times E_1 \times Coef_{res} & \sigma_{B2} &= \varepsilon_{B2} \times E_2 \times Coef_{res} \\ \tau_{B12} &= \gamma_{B12} \times G_{12} \times Coef_{res} & \tau_{B23} &= \gamma_{B23} \times G_{23} \times Coef_{res}\end{aligned}\quad (3.1)$$

де: E_1, E_2, G_{12}, G_{23} – пружні характеристики;

$\varepsilon_{B1}, \varepsilon_{B2}$ – теоретична руйнуюча відносна деформація розтягування, стискання та зсуву елементарного шару в напрямках 1 та 2 місцевої системи координат, що знайдена для шару експериментально (табл. 3.1);

γ_{B12} – теоретична руйнуюча деформація зсуву в площині елементарного шару;

γ_{B23} – теоретична руйнуюча деформація міжшарового зсуву в площині елементарного шару;

$Coef_{res}$ – коефіцієнт, що враховує адгезійні властивості сполучника (наведений в табл.3.2).

Таблиця 3.1 – Теоретичні руйнівні відносні деформації в односпрямованому типі армування, %

Деформація		Тип армуючого волокна				
		Е скло	Р скло	НС вуглець	ІМ вуглець	НМ вуглець
Розтягування	$\varepsilon_{br1}, \%$	2.7	3.1	1.2	1.15	0.7
	$\varepsilon_{br2}, \%$	0.42	0.35	0.85	0.65	0.4
Стискання	$\varepsilon_{br1}, \%$	1.8	1.8	0.85	0.65	0.45
	$\varepsilon_{br2}, \%$	1.55	1.1	2.3	2.3	2.1
Зсув	$\gamma_{br12}, \%$	1.8	1.5	1.6	1.7	1.8

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти $Coef_{res}$

Сполучник		
Поліефірний	Вінілефірний	Епоксидний
0.8	0.9	1

Аналіз конструкцій із композиційних матеріалів базується на коефіцієнтах безпеки, основаних на теоретичній міцності елементарних шарів (типі сполучника, волокна), значення яких використовуються для оцінки міцності всього пакета шаруватого пластику.

Запаси міцності CF у кожному елементарному шарі визначаються: як відношення між теоретичною міцністю та прикладеним напруженням. Розглядають три типи напружень, відповідно до виду навантаження волокон:

- Напруження, паралельні волокну (поздовжній напрямок). Ці напруження розташовані в такий спосіб:
 - у напрямку 0^0 для односпрямованої стрічки або тканини;
 - у напрямку 0^0 і 90^0 для тканинної рівниці.
- Напруження перпендикулярно до волокна (поперечний напрямок). Ці напруження розташовані в такий спосіб:
 - у напрямку 90^0 односпрямованої стрічки або тканини.
- Напруження зсуву у площині шару. Ці напруження, можуть зустрічатися у всіх типах армування.

Для оцінки міцності використовуються два критерія руйнування. Ці два критерії руйнування повинні бути перевірені для кожного індивідуального шару пакета:

а) Критерій максимальних напружень, що приводить до руйнування пакета у разі руйнування складових смола/волокно одного із індивідуальних шарів пакету [74].

Критерій максимальних напружень записується для кожної окремої компоненти напруженого стану у небезпечній точці індивідуального шару пакета в осях армування 1–2–3 (рис.3.1)

$$\left(\frac{|\sigma|}{\sigma_B}\right)^{-1} \geq CF \quad (3.2)$$

де $|\sigma|$ – міцність по модулю розрахункової компоненти напруженого стану ($\sigma_{1P}, \sigma_{1C}, \sigma_{2P}, \sigma_{2C}, \tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{23}$); σ_B – руйнівні наруги ($\sigma_{B1,P}, \sigma_{B1,C}, \sigma_{B2,P}, \sigma_{B2,C}, \tau_{B12}, \tau_{B13}, \tau_{B23}$); CF – коефіцієнт безпеки.

Мінімальний припустимий коефіцієнт безпеки має вид:

$$CF = C_V C_F C_R C_I \quad (3.3)$$

де: C_V – коефіцієнт, що приймає до уваги ефект старіння композиційних матеріалів. Цей коефіцієнт приймається рівним $C_V = 1,2$ для шаруватих пластиків;

C_F – коефіцієнт, що приймає до уваги спосіб формування й відтворюваності процесу виготовлення. Цей коефіцієнт приймається рівним $C_F = 1,2$ у випадку використання препрегів;

C_R – коефіцієнт, що приймає до уваги тип навантаження, що сприймається волокнами армування. Цей коефіцієнт приймається рівним $C_R = 1,2$ – для напружень розтягування або напружень стискання, перпендикулярних безперервному волокну системи армування (односпрямована стрічка або тканина);

C_I – коефіцієнт, що приймає до уваги тип зовнішніх навантажень. Для випадку навантаження гідростатичним тиском морської води $C_I = 1,0$.

в) Комбінований енергетичний критерій Цай-Ву або Гофмана для плоского напруженого стану, визначений за наступною формулою:

$$CF = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 + 4a}}{2a} \quad (3.4)$$

де

$$a = \frac{\sigma_1^2}{\sqrt{\sigma_{B1,P} \cdot \sigma_{B1,C}}} + \frac{\sigma_2^2}{\sqrt{\sigma_{B2,P} \cdot \sigma_{B2,C}}} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sqrt{\sigma_{B1,P} \cdot \sigma_{B1,C}}} + \frac{\tau_{12}^2}{\tau_{B12}^2}$$

$$b = \frac{\sqrt{\sigma_{B1,C}} / \sqrt{\sigma_{B1,P}}}{\sqrt{\sigma_{B1,P} \cdot \sigma_{B1,C}}} \cdot \sigma_1 + \frac{\sqrt{\sigma_{B2,C}} / \sqrt{\sigma_{B2,P}}}{\sqrt{\sigma_{B2,P} \cdot \sigma_{B2,C}}} \cdot \sigma_2$$

$\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ – розрахункові місцеві напруження в індивідуальному шарі в осях армування.

Для розрахунку напружень в тороїдальному міцному корпусі використовуються формули:

$$\sigma_\theta = \frac{T_1}{h} + \frac{12M_1}{h^3} \gamma, \quad \sigma_\psi = \frac{T_2}{h},$$

де, $h = h_1 l_1 + h_2 l_2$ – загальна товщина пакету стінки оболонки.

3.3 Загальний метод розрахунку напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу, виготовленого намотуванням із полімерних композиційних матеріалів, при гідростатичному стисканні

На основі теорії розрахунку тонкостінних оболонок сформовано метод розрахунку НДС намотаного тороїдального міцного корпусу (рис 3.2), що знаходиться під дією гідростатичного стискання, як шаруватої ортотропної замкненої тороїдальної оболонки кругового поперечного перерізу з моношарами змінної товщини та осередненої постійної товщини. Така постановка задачі в дискретній постановці вперше враховує технологічні можливості реалізації різних схем армування та виникаючих при намотуванні тороїдальних оболонок нерівномірностей розподілу товщини стінки вздовж меридіану.



Рисунок 3.2 – Метод розрахунку НДС тороїдального міцного корпусу, виконаного методом намотування із односпрямованого ПКМ, при гідростатичному стисканні

3.4 Теоретичні залежності, які описують напружено-деформований стан ортотропного тороїдального міцного корпусу, що знаходиться під дією зовнішнього тиску

В якості міцного корпусу підводного технічного засобу розглядається ортотропна тороїдальна оболонка (рис.3.3) виготовлена із ПКМ.

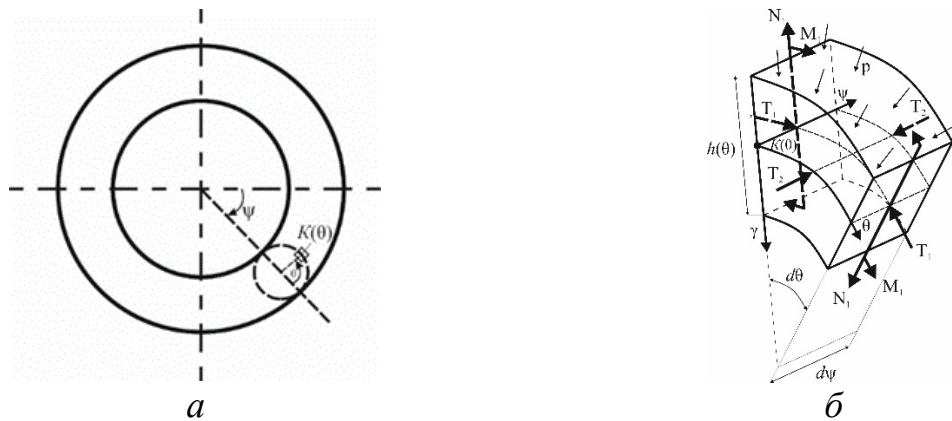


Рисунок 3.3 – Геометричні параметри діаметрального перерізу тороїдальної оболонки змінної товщини (а) та погонні зусилля в точці типу $K(\theta)$, серединної поверхні оболонки (б)

Напружено-деформований стан замкненої тороїдальної оболонки під дією рівномірно розподіленого зовнішнього тиску p [Па] розглядається як вісесиметрична задача (по координаті $0 \leq \psi \leq 2\pi$). Система рівнянь рівноваги для вісесиметричної задачі ортотропної тороїдальної оболонки для т. $K(\theta)$ має вигляд [98]:

$$\begin{cases} \frac{\partial B T_1}{\partial \theta} - \frac{\partial B}{\partial \theta} + A B k_1 N_1 = 0 \\ \& - (k_1 T_1 + k_2 T_2) + \frac{1}{A B} \frac{\partial B N_1}{\partial \theta} = p \end{cases} \quad (3.5)$$

де $A = a$, $B = \frac{a}{k}(1 + k \cos \theta)$ – коефіцієнти Ламе для тороїдальної поверхні;

$k = \frac{a}{R}$ – геометричний параметр форми тора;

k_1, k_2 – головні кривизни;

T_1, T_2 – погонні нормальні зусилля;

N_1 – перерізуюча сила;

M_1 – згинальний момент.

В формулі (3.5) та наступних індекси 1 і 2 відповідають двом криволінійним координатам θ і ψ , відповідно.

В основі теорії згинання тонких оболонок прийнята гіпотеза прямих нормалей, за якою точки, що належать нормалі до серединної поверхні до деформації, залишаються лежати на прямій, нормальній до серединної поверхні, і після деформації. Насправді, в процесі деформації оболонки прямолінійність нормалей дещо порушується: це пов'язано зі зсувами в перерізах, нормальних до серединної поверхні. Тому, гіпотеза прямих нормалей зводиться до припущення про те, що зсуви в нормальних перерізах малі в порівнянні з кутами поворотів нормалей і тому – деформацією зсуву можна, як правило, знехтувати [101].

Геометричні залежності піввідношення мають вигляд [98]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{A} \frac{\partial u(\theta)}{\partial \theta} + k_1 w(\theta), & \varepsilon_2 &= \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \theta} u(\theta) + k_2 w(\theta), \\ \chi_1 &= -\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{A} \frac{\partial w(\theta)}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial k_1}{\partial \theta} \frac{u(\theta)}{A}, & \chi_2 &= -\frac{1}{A^2 B} \frac{\partial B}{\partial \theta} \frac{\partial w(\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial k_2}{\partial \theta} \frac{u(\theta)}{A},\end{aligned}\tag{3.6}$$

де $u(\theta)$ – тангенціальне переміщення т. $K(\theta)$ вздовж кутової координати θ ; $w(\theta)$ – радіальне переміщення т. $K(\theta)$ за радіусом меридіанного перерізу тора.

Вирази для погонних зусиль, перерізуючих сил та моментів в т. $K(\theta)$ мають вигляд [84]:

$$\begin{aligned}N_1 &= \frac{1}{AB} \frac{\partial B M_1}{\partial \theta}, & N_2 &= 0, \\ T_1 &= C_{11} \varepsilon_1 + C_{12} \varepsilon_2, & T_2 &= C_{22} \varepsilon_2 + C_{12} \varepsilon_1, \\ M_1 &= D_{11} \chi_1 + D_{12} \chi_2, & M_2 &= 0,\end{aligned}\tag{3.7}$$

де C_{ij}, D_{ij} – жорсткості композитної оболонки ($i, j=1, 2$) [99].

Підставляючи значення компонентів деформації з (3.6) в (3.7), а отримані вирази для внутрішніх зусиль і моментів та вирази (3.7) в (3.5) (враховуючи, що жорсткості $C_{ij}(\theta)$, $D_{ij}(\theta)$ функції від θ для оболонки змінної товщини), отримано рівняння рівноваги в переміщеннях для замкненої ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини:

$$\begin{aligned} L_{11}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D'_{ij})u + L_{12}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D')w &= 0, \\ L_{21}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D'_{ij})u + L_{22}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D')w &= p, \end{aligned} \quad (3.8)$$

де лінійні диференціальні оператори L_{ij} мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} L_{11}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D'_{ij}) &= -C_{12} \cos \theta - D_{12} \frac{k + \cos \theta}{a^2(1 + k \cos \theta)^2} - C_{22} \frac{k \sin^2 \theta}{1 + k \cos \theta} - C'_{12} \sin \theta - \\ &- D'_{12} \frac{\sin \theta}{a^2(1 + k \cos \theta)} - C_{11} \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} - D_{12} \frac{\sin \theta}{a^2(1 + k \cos \theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} + C'_{11} \left(\frac{1}{k} + \cos \theta \right) \frac{\partial}{\partial \theta} + \\ &+ C_{11} \left(\frac{1}{k} + \cos \theta \right) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \\ L_{12}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D'_{ij}) &= -C_{11} \sin \theta + C_{22} \frac{k \cos \theta \sin \theta}{1 + k \cos \theta} + C'_{11} \left(\frac{1}{k} + \cos \theta \right) + C'_{12} \cos \theta + C_{11} \left(\frac{1}{k} + \cos \theta \right) \frac{\partial}{\partial \theta} + \\ &+ C_{12} \cos \theta \frac{\partial}{\partial \theta} + D'_{12} \frac{1}{a^2} (\cos \theta + \sin \theta) \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{\sin \theta}{a^2} (D_{11} + D_{12}) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} - D'_{11} \frac{1}{a^2} \left(\frac{1}{k} + \cos \theta \right) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} - \\ &- D_{11} \frac{1}{a^2} \left(\frac{1}{k} + \cos \theta \right) \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned}
L_{21}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D'_{ij}D''_{ij}) = & C_{12} \frac{a^2 k \sin \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)^3} \left(\frac{1}{1+k \cos \theta} + 3k \cos \theta + \frac{k \cos^3 \theta}{1+k \cos \theta} \right) + \\
& + D_{12} \frac{k \sin \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)^3} \left(\frac{1}{1+k \cos \theta} - 2k \right) + C_{22} \frac{a^2 k^2 \sin 2\theta}{a^4 (1+k \cos \theta)^3} \left(\frac{1}{2(1+k \cos \theta)} + \cos \theta \right) - \\
& - D'_{12} \frac{2k}{a^4 (1+k \cos \theta)^3} (k + \cos \theta) - C_{12} \frac{a^2 k \cos \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)^3} \left(3k \cos \theta + \frac{1+k^3 \cos \theta}{1+k \cos \theta} \right) \frac{\partial}{\partial \theta} - \\
& - D''_{12} \frac{k \sin \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)^4} (1 + 2k \cos \theta + k^2 \cos^2 \theta) - C_{11} \frac{1}{a^2 (1+k \cos \theta)^4} (1 + 4k \cos \theta + 6k^2 \cos^2 \theta + \\
& + 4k^3 \cos^3 \theta + k^4 \cos^4 \theta) \frac{\partial}{\partial \theta} - D_{12} \frac{2k}{a^4 (1+k \cos \theta)^4} (k + \cos \theta + k^2 \cos \theta + k \cos^2 \theta) \frac{\partial}{\partial \theta} - \\
& - D'_{12} \frac{2k \sin \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)^4} (1 + 4k \cos \theta + 2k^2 \cos^2 \theta) \frac{\partial}{\partial \theta} - D_{12} \frac{k \sin \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)^4} (1 + 2k \cos \theta + k^2 \cos^2 \theta) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
L_{22}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D'_{ij}) = & -C_{11} \frac{1}{a^2 (1+k \cos \theta)^2} (1 + 2k \cos \theta + k^2 \cos^2 \theta) - C_{12} \frac{2k \cos \theta}{a^2 (1+k \cos \theta)} - \\
& - C_{22} \frac{k^2 \cos^2 \theta}{a^2 (1+k \cos \theta)^2} + D'_{12} \frac{2k \cos \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{k \sin \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)} (D''_{12} - D_{12}) \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{k \cos \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)} (D_{11} + \\
& + 2D_{12}) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + (D'_{11} + D'_{12}) \frac{k}{a^4 (1+k \cos \theta)^2} (2 \sin \theta + k \sin 2\theta) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} - D''_{11} \frac{1}{a^4 (1+k \cos \theta)^2} (1 + 2k \cos \theta + \\
& + k^2 \cos^2 \theta) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + D_{11} \frac{k}{a^4 (1+k \cos \theta)^2} (2 \sin \theta + k \sin 2\theta) \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} + D_{12} \frac{k \sin \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)} \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} - \\
& - D'_{11} \frac{2}{a^4 (1+k \cos \theta)^2} (1 + 4k \cos \theta + k^2 \cos^2 \theta) \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} - D_{11} \frac{1}{a^4 (1+k \cos \theta)^2} (1 + 2k \cos \theta + k^2 \cos^2 \theta) \frac{\partial^4}{\partial \theta^4}
\end{aligned}$$

Для замкненої в обох напрямках кругової тороїдальної оболонки розв'язок повинен задовольняти періодичності відносно кута θ , тому – знаходиться він в вигляді [104]:

$$\begin{aligned}
u(\theta) &= \sum_{m=0}^{\infty} u_m \sin(m\theta), \\
w(\theta) &= \sum_{m=0}^{\infty} w_m \cos(m\theta).
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Інтегруючи рівняння рівноваги (3.8) за методом Бубнова-Гальоркіна [105] по θ і ψ по поверхні тору, приймаючи до уваги, що елемент площі тору дорівнює:

$$ABd\theta d\psi = \left[\frac{a^2(1+k \cos \theta)}{k} \right] d\theta d\psi,$$

отримуємо систему незкінчених лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned}\sum_{m=0}^M (L_{11m}u_m + L_{21m}w_m) &= 0, \\ \sum_{m=0}^M (L_{21m}u_m + L_{22m}w_m) &= p.\end{aligned}\tag{3.11}$$

3.5 Напружено-деформований стан тороїдального міцного корпусу, виготовленого методом поперечного намотування в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою), при гідростатичному стисканні

Жорсткості C_{ij} , D_{ij} повинні забезпечувати відповідність реального технологічного процесу виготовлення намотаного тороїдального корпусу розрахунковій моделі композиційного матеріалу.

Порядок розміщення шарів в пакеті багатошарового матеріалу повинен враховуватись при розрахунку його жорсткостей. [99] Складаються всі моношари, що входять до пакета оболонки.

При виготовленні тороїдального міцного корпусу методом поперечного намотування в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою), жорсткості C_{ij} , D_{ij} будуть змінними величинами, функціями координати θ , та визначатимуться за формулами, що описують дискретну розрахункову модель структури стінки композиційного матеріалу змінної товщини:

$$C_{11}(\theta) = B_1 l_2 h_2 + B_2 (l_1 + l_2) h_1(\theta);$$

$$C_{12}(\theta) = B_2 l_2 h_2 + B_1 (l_1 + l_2) h_1(\theta);$$

$$C_{22}(\theta) = B_{12} (l_2 h_2 + (l_1 + l_2) h_1(\theta));$$

$$\begin{aligned}
D_{11}(\theta) &= \frac{1}{3} \sum_{s=1}^{l_2} [B_{11}[(s(h_2 + h_1(\theta)) - h_1(\theta))^3 - (s-1)^3(h_2 + h_1(\theta))^3] + B_{22}[(h_2 + h_1(\theta))^3 s^3 - \\
&- (s(h_2 + h_1(\theta)) - h_1(\theta))^3] + \frac{1}{3} B_{22} \sum_{x=1}^{l_1} [(l_2(h_2 + h_1(\theta)) + x h_1(\theta))^3 - (l_2(h_2 + h_1(\theta)) + \\
&+ (x-1)h_1(\theta))^3] - \frac{1}{2} [h_1(\theta)(l_2 + l_1) + l_2 h_2] [l_2 h_2 h_1(\theta)(B_{22} - B_{11})(1 + l_1) + \frac{1}{2} [h_1(\theta)(l_2 + l_1) + \\
&+ l_2 h_2] [B_{22} h_1(\theta)(l_1 + l_2) + B_{11} l_2 h_2]] \\
D_{22}(\theta) &= \frac{1}{3} \sum_{s=1}^{l_2} [B_{22}[(s(h_2 + h_1(\theta)) - h_1(\theta))^3 - (s-1)^3(h_2 + h_1(\theta))^3] + \\
&+ B_{11}[(h_2 + h_1(\theta))^3 s^3 - (s(h_2 + h_1(\theta)) - h_1(\theta))^3] + \frac{1}{3} B_{11} \sum_{x=1}^{l_1} [(l_2(h_2 + h_1(\theta)) + x h_1(\theta))^3 - \\
&- (l_2(h_2 + h_1(\theta)) + (x-1)h_1(\theta))^3] - \frac{1}{2} [h_1(\theta)(l_1 + l_2) + l_2 h_2] [l_2 h_2 h_1(\theta)(B_{11} - B_{22})(1 + l_1) + \\
&+ \frac{1}{2} [h_1(\theta)(l_1 + l_2) + l_2 h_2] [B_{11} h_1(\theta)(l_1 + l_2) + B_{22} l_2 h_2]] \\
D_{12}(\theta) &= \frac{1}{3} B_{12} \sum_{s=1}^{l_2} [s^3(h_2 + h_1(\theta))^3 - (s-1)^3(h_2 + h_1(\theta))^3] + \frac{1}{3} B_{12} \sum_{x=1}^{l_1} [(l_2(h_2 + h_1(\theta)) + x h_1(\theta))^3 - \\
&- (l_2(h_2 + h_1(\theta)) + (x-1)h_1(\theta))^3] - \frac{1}{4} B_{12} [h_1(\theta)(l_1 + l_2) + l_2 h_2]^3 \\
&B_{11} = \frac{E_1}{1 - \mu_{12}\mu_{21}}, \quad B_{22} = \frac{E_2}{1 - \mu_{12}\mu_{21}}, \quad B_{12} = \frac{E_2\mu_{12}}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} = \frac{E_1\mu_{21}}{1 - \mu_{12}\mu_{21}}.
\end{aligned}$$

де $h_1(\theta) = h_{\Pi}(\theta, k)$ – товщина поперечного моношару пакету;

$h_{\Sigma}(\theta, k, l_1, l_2)$ – сумарна товщина стінки оболонки [99].

Після перетворень, жорсткості C_{ij} , D_{ij} мають вигляд:

$$\begin{cases} D_{11}(\theta) = R_1 h_1^2(\theta) + R_2 h_1(\theta) + R_3 h_1^3(\theta) + R_4 \\ D_{22}(\theta) = R_2 h_1^2(\theta) + R_6 h_1(\theta) + R_7 h_1^3(\theta) + R_8 \\ D_{12}(\theta) = R_9 h_1^3(\theta) + R_{10} h_1^2(\theta) + R_{11} h_1(\theta) + R_{12} \\ C_{11}(\theta) = R_{13} + R_{14} h_1(\theta) \\ C_{22}(\theta) = R_{15} + R_{16} h_1(\theta) \\ C_{12}(\theta) = R_{17} + R_{18} h_1(\theta) \end{cases}$$

де R_f ($f=1, 2 \dots 18$) функція, яка залежить від параметрів, що характеризують структуру намотаної тороїдальної оболонки, та від властивостей моношару (волокна або армуючої стрічки):

$$\begin{aligned}
R_1 &= \frac{1}{12} h_2 l_2 [B_{11}(l_2^2 + 3l_1^2) + 2l_2 B_{22}(l_2 + 3l_1) + 2(B_{11} - B_{22})(3l_1 + 1)], \\
R_2 &= \frac{1}{12} h_2^2 l_2 [2B_{11}l_2^2 + B_{22}l_2^2 + 3l_1 l_2 B_{22} + 2(B_{22} - B_{11})], \\
R_3 &= \frac{1}{12} B_{22}(l_2 + l_1)^3, \quad R_4 = \frac{1}{12} B_{11} h_2^3 l_2^3, \\
R_5 &= \frac{1}{12} h_2 l_2 [l_2^2(2B_{11} + B_{22}) + 3l_1(2l_2 B_{11} + l_1 B_{22}) + 2(B_{22} - B_{11})(3l_1 + 1)], \\
R_6 &= \frac{1}{12} h_2^2 l_2 [l_2^2(B_{11} + 2B_{22}) + 3l_1 l_2 B_{11} + 2(B_{11} - B_{22})], \\
R_7 &= \frac{1}{12} B_{11}(l_2 + l_1)^3, \quad R_8 = \frac{1}{12} B_{22} h_2^3 l_2^3, \\
R_9 &= \frac{1}{12} B_{12}(l_2 + l_1)^3, \quad R_{10} = \frac{3}{12} B_{12}(l_2 + l_1)^2 l_2 h_2, \\
R_{11} &= \frac{3}{12} B_{12}(l_2 + l_1)^2 l_2^2 h_2^2, \quad R_{12} = \frac{1}{12} B_{12} h_2^3 l_2^3, \\
R_{13} &= B_{11} h_2 l_2, \quad R_{14} = B_{22}(l_1 + l_2), \\
R_{15} &= B_{22} h_2 l_2, \quad R_{16} = B_{11}(l_1 + l_2), \\
R_{17} &= B_{12} h_2 l_2, \quad R_{18} = B_{12}(l_1 + l_2).
\end{aligned}$$

$$E_1 = E_B \eta + (1 - \eta) E_M, \quad E_2 = \frac{E_B E_M}{\eta E_M + (1 - \eta) E_B}. \quad (3.12)$$

$$\mu_{12} = \mu_B \eta + (1 - \eta) \mu_M, \quad \mu_{21} = \frac{\mu_{12} E_2}{E_1}. \quad (3.13)$$

де η – коефіцієнт заповнення об'єму.

Пружні характеристики моношару E_1 , E_2 , μ_{12} та μ_{21} визначаються експериментально або розраховуються за властивостями компонентів за математичними моделями (3.12) та (3.13).

Для отримання переміщень закон зміни товщини вздовж меридіана для поперечних моношарів, як функція від θ , розкладався в біноміальний ряд при утримуванні 4 членів ряду для отримання точності розв'язку, збіжність якого обчислювалась чисельно:

$$h_2(\theta)=h_{\Pi}(\theta,k)=h_1(1+k)(1-k \cos \theta +k^2 \cos^2 \theta -k^3 \cos^3 \theta)$$

Підставляючи жорсткості C_{ij} , D_{ij} в рівняння рівноваги (3.11) в переміщеннях для замкненої ортотропної тороїдальної оболонки, які потім інтегруються методом Бубнова-Гальоркіна, отримуємо чисельний розв'язок для переміщень тороїдального міцного корпусу, виконаного методом поперечного намотування в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою).

Використання отриманого розв'язку обмежене областю $0 \leq k \leq 0,5$ виходячи із практичного використання тороїдальної оболонки в якості міцного корпусу підводних технічних засобів. [113]

Даний розв'язок не включає в себе залежності, що отримані для ізотропного і композитного тороїдального корпусу з постійною товщиною.

Через складність отриманого розв'язку та неможливості представлення отриманих результатів в аналітичній формі, всі подальші результати представлено у вигляді епюр та графіків для конкретних матеріалів. В якості прикладу міцного корпусу ($a = 1$ м, $k = 1/3$) підводно-технічного засобу розглядаються ортотропні тороїдальні оболонки зі СП та ВП. Пружні характеристики моношару та осереднена товщина пакету обрані з позиції стійкості згідно рішень [85] для глибини занурення $H = 1000$ м ($P_{кр} = 10$ МПа): із СП (S-2 GLAAS/Ероху) – $E_1 = 59$ ГПа, $E_2 = 20$ ГПа, $\mu_1 = 0,28$, $h_{\Sigma} = 0,064$ м та із ВП (М35J/Ероху) – $E_1 = 207$ ГПа, $E_2 = 7,4$ ГПа, $\mu_1 = 0,348$, $h_{\Sigma} = 0,04$ м. Товщина моношарів складала зі СП $h_2 = 0,25 \cdot 10^{-3}$ м, а із ВП – $h_2 = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м.

3.5.1 Аналіз збіжності рядів розв'язку

В якості прикладу міцного корпусу ($a=1$ м, $k=1/3$) підводно-технічного засобу розглядається ортотропна тороїдальна оболонка зі СП.

Збіжність розв'язку (рис. 3.4) аналізувалась на числових прикладах для прогинів $w(\theta)$ при утриманні по m кінцевого числа членів ряду $M = 0,1,\dots,9$.

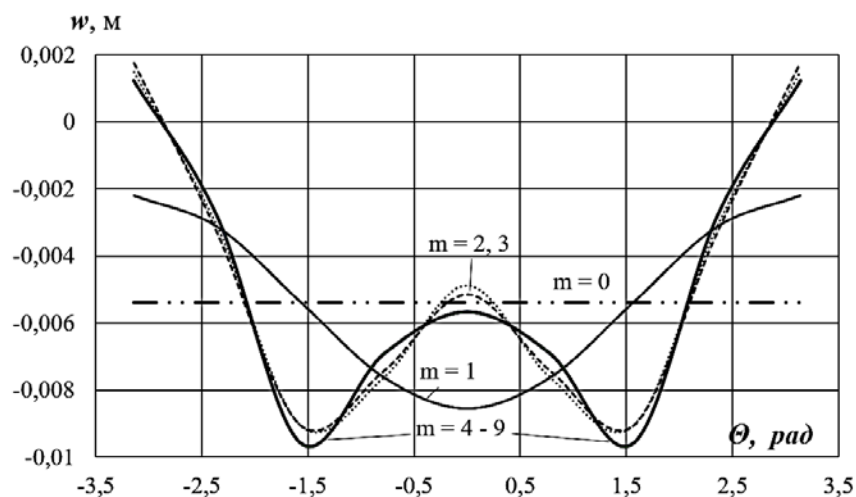


Рисунок 3.4 – Збіжність розв’язку для прогинів $w(\theta)$ ортотропної тороїдальної оболонки при гідростатичному стисканні

Із аналізу збіжності отриманих рішень для прогинів $w(\theta)$ (рис.3.4) ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини видно, що достатньо утримувати $M = 4$ члени ряду. Також можна зазначити, що максимальний прогин спостерігається при $\theta = \pm\pi/2$.

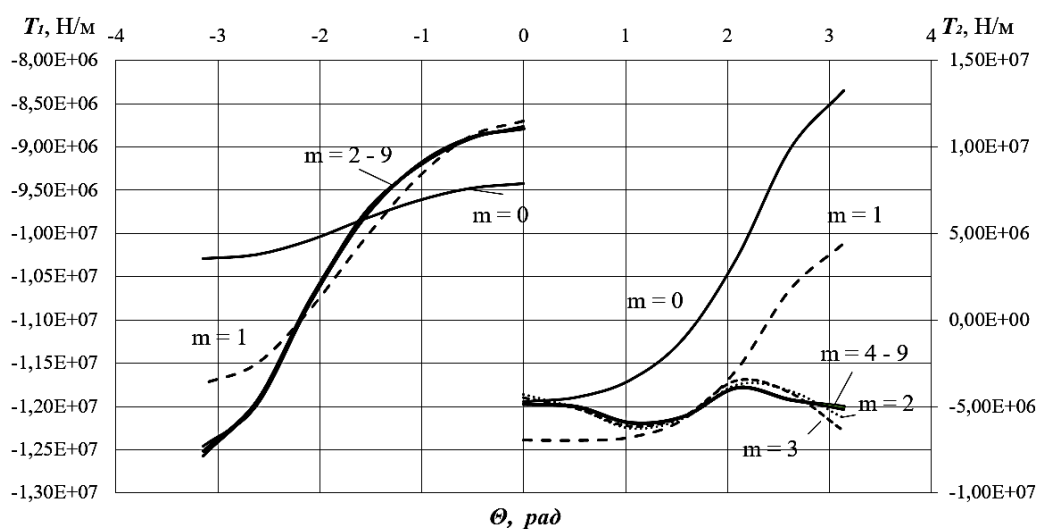


Рисунок 3.5 – Збіжність розв’язку для нормальних зусиль T_1 та T_2 ортотропної тороїдальної оболонки при гідростатичному стисканні

З аналізу збіжності отриманих розв’язків для нормальних зусиль T_1 та T_2 (рис. 3.5) ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини видно, що достатньо утримувати $M = 4$ члени ряду. Також, можна зазначити, що

максимальне нормальне зусилля T_1 спостерігається при $\theta = \pm\pi$, а максимальне нормальне зусилля T_2 – при $\theta = \pm\pi/2$.

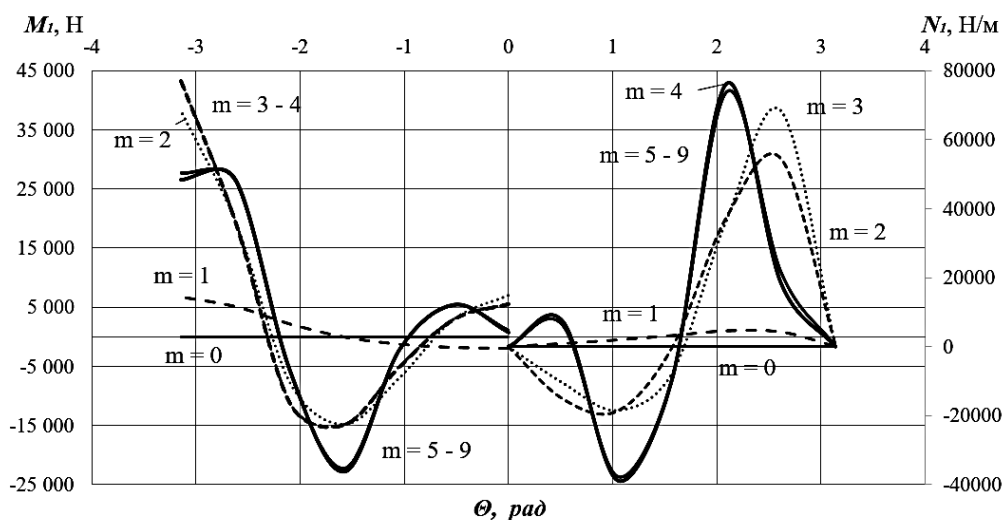


Рисунок 3.6 – Збіжність розв’язку для згинаючого моменту M_1 та перерізуючої сили N_1 ортотропної тороїдальної оболонки при гідростатичному стисканні

З аналізу збіжності отриманих розв’язків для згинаючого моменту M_1 та перерізуючої сили N_1 (рис. 3.6) ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини видно, що достатньо утримувати $M = 5$ та $M = 4$ члени ряду, відповідно. Також, можна зазначити, що максимальний згинальний момент спостерігається при $\theta = \pm\pi/2$, а максимальна перерізуюча сила – при $\theta = \pm 5\pi/6$.

3.6 Аналіз напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу, виготовленого способом поперечного намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням, при гідростатичному стисканні

На базі отриманих розв’язків для переміщень u_m та w_m було побудовано епюри розподілу товщини, переміщень та нормальних зусиль для серединної лінії за меридіанним перерізом тора.

Приклад числового розрахунку епюр розподілу: товщин $h(\theta)$, прогинів $w(\theta)$, нормальних зусиль $T_1(\theta)$ і $T_2(\theta)$, згинаючого моменту $M_1(\theta)$ та перерізуючої сили $N_1(\theta)$ у меридіанному перерізі тора при $M=5$ на основі представленого розв'язку вказано на рисунку 3.7 для обох вищезгаданих матеріалів оболонок.

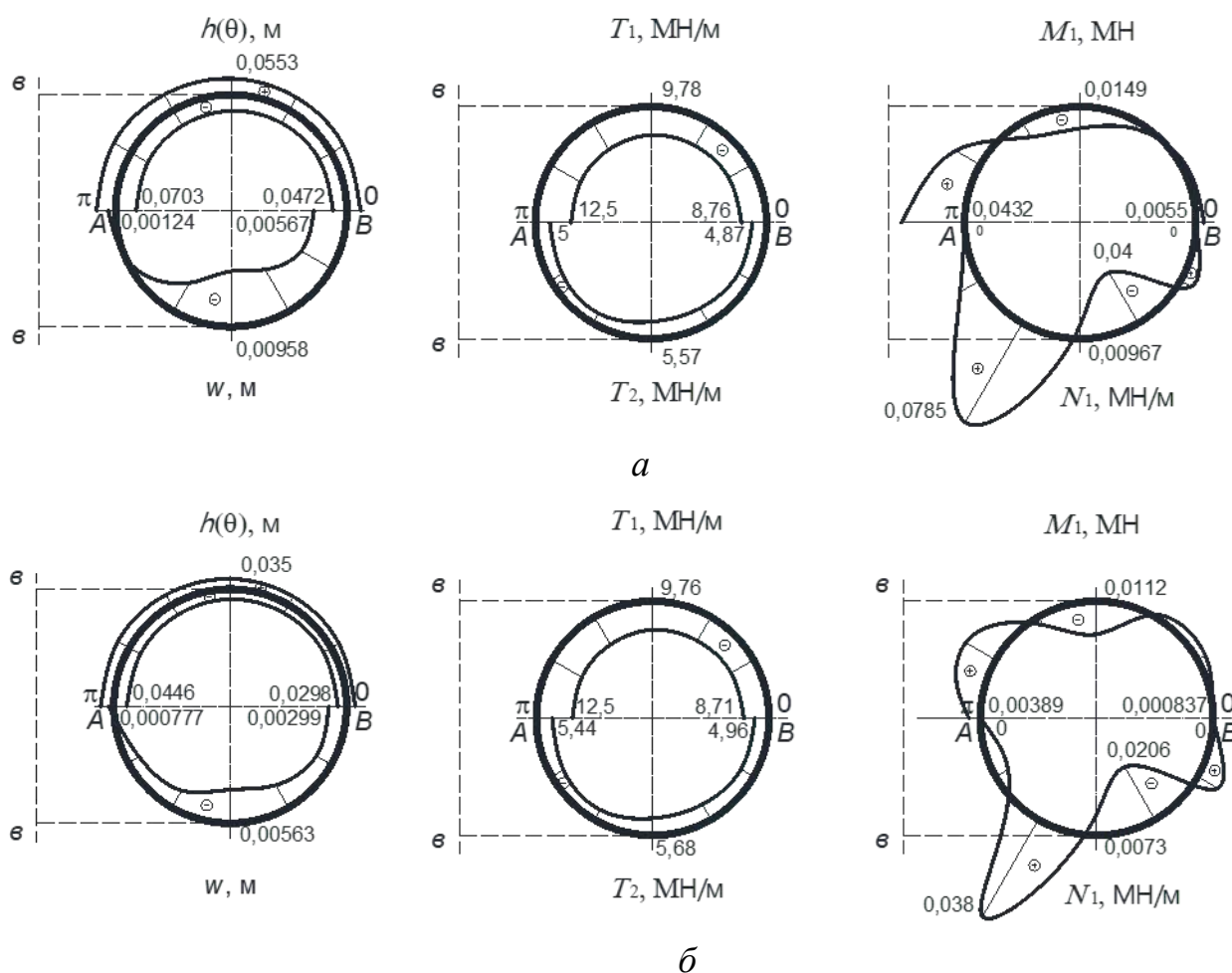


Рисунок 3.7 – Епюри розподілу товщин $h(\theta)$, прогинів $w(\theta)$, нормальних зусиль $T_1(\theta)$ і $T_2(\theta)$, згинаючого моменту $M_1(\theta)$ та перерізуючої сили $N_1(\theta)$, для намотаних тороїдальних міцних корпусів ($a=1$ м, $k=1/3$) на глибині $H=1000$ м для СП S-2 GLASS/Ероху (а) та ВП М35J/Ероху (б)

Епюра розподілу товщин $h(\theta)$ демонструє нерівномірність товщини оболонки за рахунок ущільнення волокон на внутрішньому полюсі A ($h_{\max}=70,3$ мм, $h_{\min}=47,2$ мм для СП та $h_{\max}=44,6$ мм, $h_{\min}=29,8$ мм для ВП), в порівнянні з зовнішнім полюсом B . Ступінь нерівномірності товщини оболонки можна

описати співвідношенням $h_{\max}/h_{\min} = 70,3/47,2 = 1,49$ для СП та $h_{\max}/h_{\min} = 44,6/29,8 = 1,5$ для ВП. Еквівалентні за об'ємом осереднені товщини оболонок в прикладі [106] складали $h_{\Sigma}^{GRP} = 0,064$ та $h_{\Sigma}^{CRP} = 0,04$ м. Це не могло не сказатись на нерівномірності всіх інших епюр.

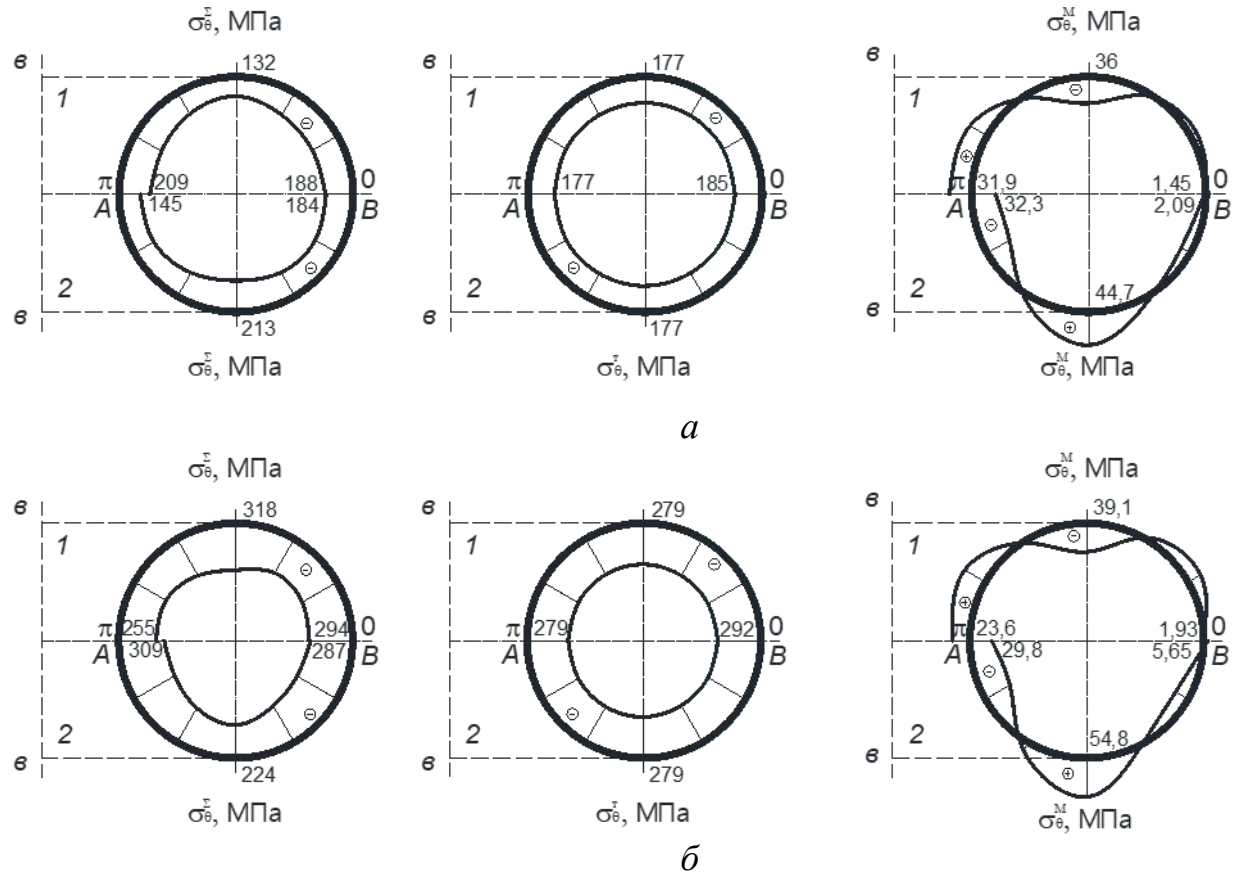


Рисунок 3.8 – Епюри розподілу напружень σ_{θ} для намотаних тороїдальних міцних корпусів на глибині $H=1000$ м для СП S-2 GLASS/Ероху (а) та ВП М35J/Ероху (б) (1 – зовнішня поверхня, 2 – внутрішня поверхня оболонки)

Епюра розподілу прогинів $w(\theta)$ дуже нерівномірна. Максимум прогинів спостерігається при $\theta = \pm\pi/2$ та складає $w_{\Sigma}^{СП} = 9,58$ мм та $w_{\Sigma}^{ВП} = 5,63$ мм. Їх відношення до товщини оболонки складає:

$$\frac{w_{\Sigma}^{СП}}{h(\theta=\pm\pi/2)} = 0,173 \text{ та } \frac{w_{\Sigma}^{ВП}}{h(\theta=\pm\pi/2)} = 0,161,$$

що дозволяє вважати оболонку тонкою навіть при $k = 1/3$. При $k < 1/3$ оболонка більш рівномірна.

Епюра нормальних зусиль $T_1(\theta)$ суттєво нерівномірна:

$$\frac{T_{1\max}^{\text{СП}}}{T_{1\min}^{\text{СП}}} = 1,41 \text{ та } \frac{T_{1\max}^{\text{ВП}}}{T_{1\min}^{\text{ВП}}} = 1,44,$$

що в основному пов'язано з функцією $h(\theta)$. Максимум нормальних зусиль спостерігається на полюсі A . Епюра $T_2(\theta)$ практично рівномірна по перерізу.

Епюра $M_1(\theta)$ має два явно виражених максимуми при $\theta = \pm\pi/2$ та $\theta = \pm 5\pi/6$. Величина моменту в полюсі B незначна.

Епюра перерізуючих сил $N_1(\theta)$ має три максимуми для СП та чотири максимуми для ВП, хоча їх максимальні значення невеликі.

Результати складання меридіанних нормальних напружень σ_θ^Σ для всіх варіантів представлено на рис.3.8. Максимальне напруження σ_θ^Σ при $P_{\text{кр}}=10$ МПа для СП S-2 GLASS/Ероху на зовнішній поверхні спостерігається в полюсі A та складає $\sigma_\theta^{\max} = 209$ МПа, а на внутрішній поверхні – в районі полюса B та складає $\sigma_\theta^{\max} = 184$ МПа. Для ВП М35J/Ероху максимальне напруження σ_θ^Σ на зовнішній поверхні спостерігається в полюсі B та становить $\sigma_\theta^{\max} = 294$ МПа, а на внутрішній поверхні – в районі полюса A та становить $\sigma_\theta^{\max} = 309$ МПа.

Показано, що врахування зміни товщини при намотуванні поперечних шарів суттєво впливає на величину напружень. Головний внесок в НДС надають нормальні зусилля $T_1(\theta)$ і $T_2(\theta)$. Врахування моменту M_1 суттєво впливає на величину сумарних значень напружень σ_θ збільшуючи їх. Для СП величина сумарних напружень складає 15,2% на полюсі A зовнішньої оболонки, та 9,64 % для ВП в полюсі A внутрішньої оболонки.

На рис. 3.9 представлено епюри розподілу напружень $\tau_{\theta\gamma}$ і σ_ψ при $P_{\text{кр}}=10$ МПа. Максимальні напруження σ_ψ в т. B ($\theta=0^\circ$) для СП S-2 GLASS/Ероху становлять $\sigma_\psi^{\max} = 104$ МПа, для ВП М35J/Ероху становлять $\sigma_\psi^{\max} = 166$ МПа, а з розрахунку за осередненою товщиною, як в роботі [88] за

рішенням Феппля, вони становили для СП $\sigma_{\theta}^{max} = 163,5$ МПа та $\sigma_{\theta}^{max} = 93,5$ МПа, для ВП $\sigma_{\theta}^{max} = 270$ МПа та $\sigma_{\theta}^{max} = 155$ МПа. Напруження $\tau_{\theta\gamma}$ низькі.

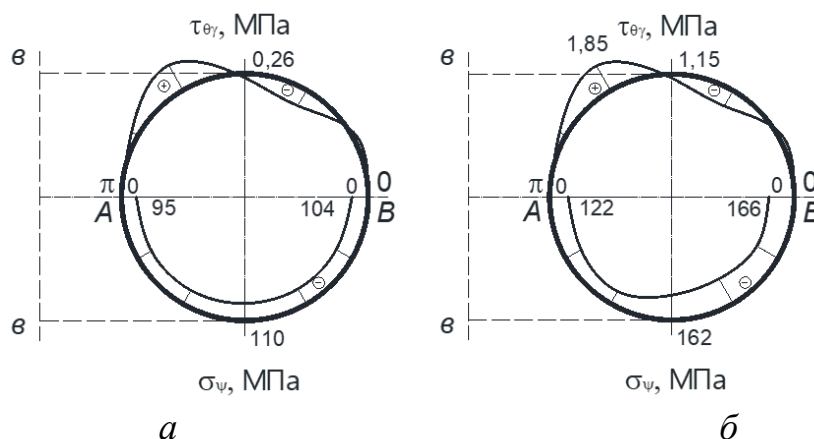


Рисунок 3.9 – Епюри розподілу напружень $\tau_{\theta\gamma}$ і σ_{ψ} для намотаних тороїдальних корпусів ($a=1$ м, $k=1/3$) на глибині $H=1000$ м для СП S-2 GLASS/Ероху (а) та ВП М35J/Ероху (б) для серединної поверхні

З аналізу отриманих даних можна зробити висновок, що невраховування зміни товщини оболонки, призводить до помилки в небезпечну сторону, яка становить для СП: σ_{θ}^{max} - 11,6%, σ_{ψ}^{max} - 9,22%, а для ВП: σ_{θ}^{max} - 7,21%, σ_{ψ}^{max} - 8,28%.

3.7 Аналіз напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу, виготовленого способом спірального намотування, при гідростатичному стисканні

Для армованих матеріалів отриманих спіральним намотуванням в дискретній розрахунковій моделі (рис. 3.10) l_2 взята рівною 0. При розрахунку жорсткостей C_{ij} та D_{ij} пружні характеристики i -го моношару в системі координат тороїдальної оболонки θ, ψ при розташуванні армуючого матеріалу під кутом φ знаходять на основі залежностей (2.8). Замість змінних кутів намотування $\varphi_G(\theta, k)$ або $\varphi_R(\theta, k)$ в виразах (2.5 – 2.6) – постійні осереднено за меридіанним перерізом для геодезичного та рівноважного намотування.

Після підстановки в (3.11) жорсткостей: C_{ij} , $D_{ij} = \text{const}$ з осередненими товщинами (товщина осередненого поперечного шару $h_1^{\text{осер}} = h_2 \cdot (1+k) = \text{const}$) для поперечного намотування в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) та спіральним намотуванням, отримано диференціальні рівняння рівноваги в переміщеннях для замкнених ортотропних тороїдальних оболонок постійної товщини. Отримані рівняння включають в себе, як частинний випадок рівняння для ізотропної оболонки постійної товщини.

На базі отриманих розв'язків для переміщень u_m та w_m було побудовано епюри розподілу товщин $h(\theta)$, прогинів $w(\theta)$, нормальних зусиль $T_1(\theta)$ і $T_2(\theta)$, згинаючого моменту $M_1(\theta)$ та перерізуючої сили $N_1(\theta)$ для обох вищезгаданих матеріалів оболонок у меридіанному перерізі тора (рис. 3.10-3.11) при утриманні 5 членів ряду по m .

Графічне представлення функції зміни товщини $h(\theta)$ при всіх видах спірального намотування підтверджує її постійність (рис. 3.10-3.11).

Епюри розподілу прогинів $w(\theta)$ суттєво нерівномірні, що підтверджує значний вклад моментного напруженого стану оболонки за меридіаном. Максимум прогинів для оболонки зі СП спостерігається в районі $\theta = \pm\pi/2$ та становить $w_{\Sigma}^{\text{СП}} = 8,78$ мм для ГСН та $w_{\Sigma}^{\text{СП}} = 10,2$ мм для РСН. Максимум прогинів для оболонки з ВП спостерігається в районі $\theta = \pm 2\pi/3$ та становить $w_{\Sigma}^{\text{ВП}} = 5,12$ мм для ГСН та $w_{\Sigma}^{\text{ВП}} = 7,43$ мм для РСН. Їх відношення до товщини оболонки складає: для ГСП $w_{\Sigma}^{\text{СП}}/h = 0,185$ та $w_{\Sigma}^{\text{ВП}}/h = 0,171$, а для РСП – $w_{\Sigma}^{\text{СП}}/h = 0,215$ та $w_{\Sigma}^{\text{ВП}}/h = 0,248$, що дозволяє вважати оболонку тонкою навіть при $k = 0,33$.

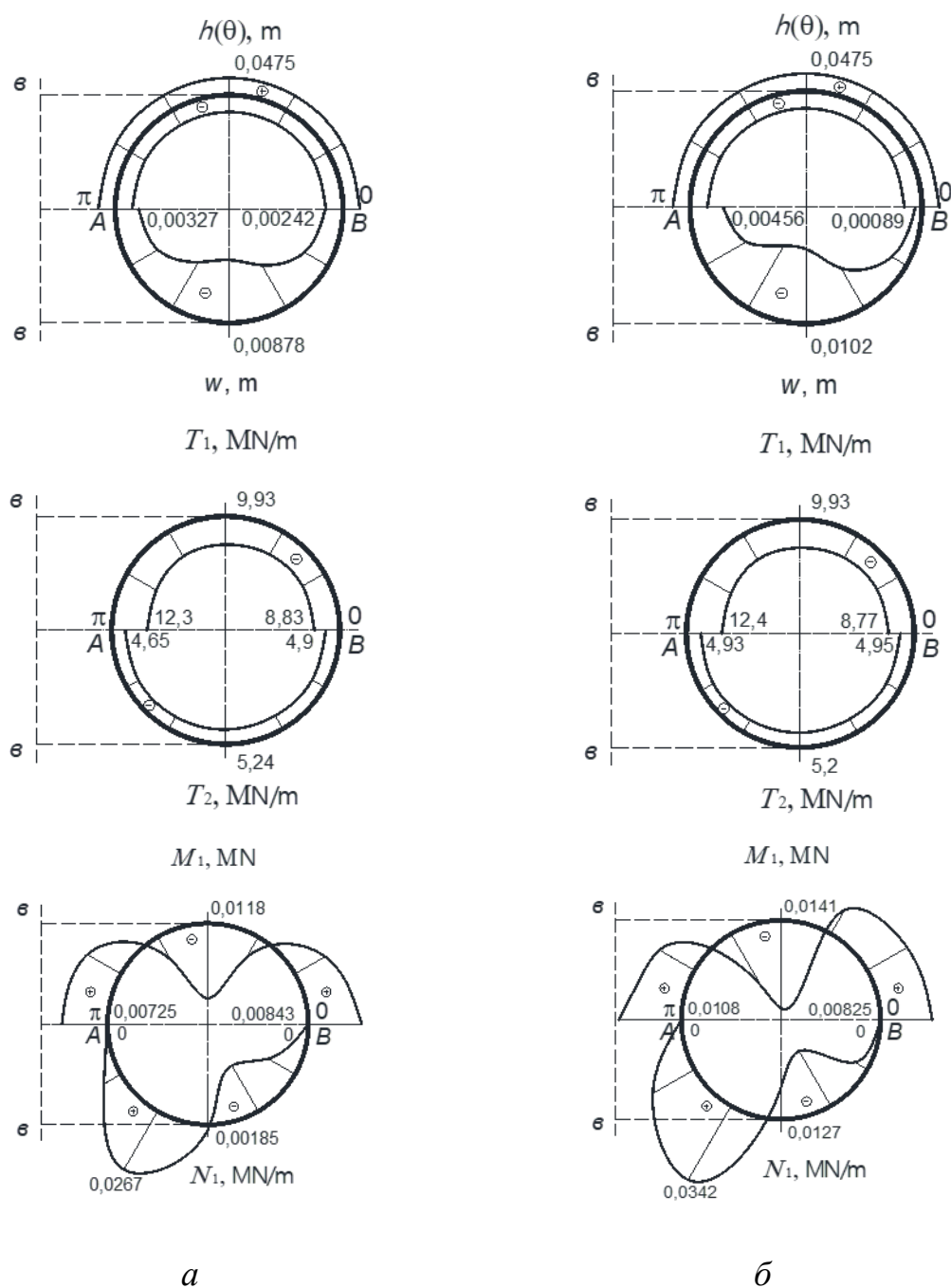


Рисунок 3.10 – Епюри розподілу товщин $h(\theta)$, прогинів $w(\theta)$, нормальних зусиль $T_1(\theta)$ і $T_2(\theta)$, згинаючого моменту $M_1(\theta)$ та перерізуючої сили $N_1(\theta)$, для спірально намотаних тороїдальних міцних корпусів ($a=1$ м, $k=0,33$) на глибині $H=1000$ м для СП S-2 GLASS/Ероху при ГСП (а) та при РСП (б)

Епюра меридіанних нормальних зусиль $T_1(\theta)$ суттєво нерівномірна, що видно зі співвідношень: для ГСН $T_1^{\text{СП}}_{\text{max}}/T_1^{\text{СП}}_{\text{min}} = 1,39$ та $T_1^{\text{ВП}}_{\text{max}}/T_1^{\text{ВП}}_{\text{min}} = 1,42$, і для РСН $T_1^{\text{СП}}_{\text{max}}/T_1^{\text{СП}}_{\text{min}} = 1,42$ та $T_1^{\text{ВП}}_{\text{max}}/T_1^{\text{ВП}}_{\text{min}} = 1,48$, що пов'язано з впливом

геометрії тору. Максимум нормальних зусиль приходить на полюс A . Епюра $T_2(\theta)$ практично рівномірна по меридіанному перерізу для всіх оболонок.

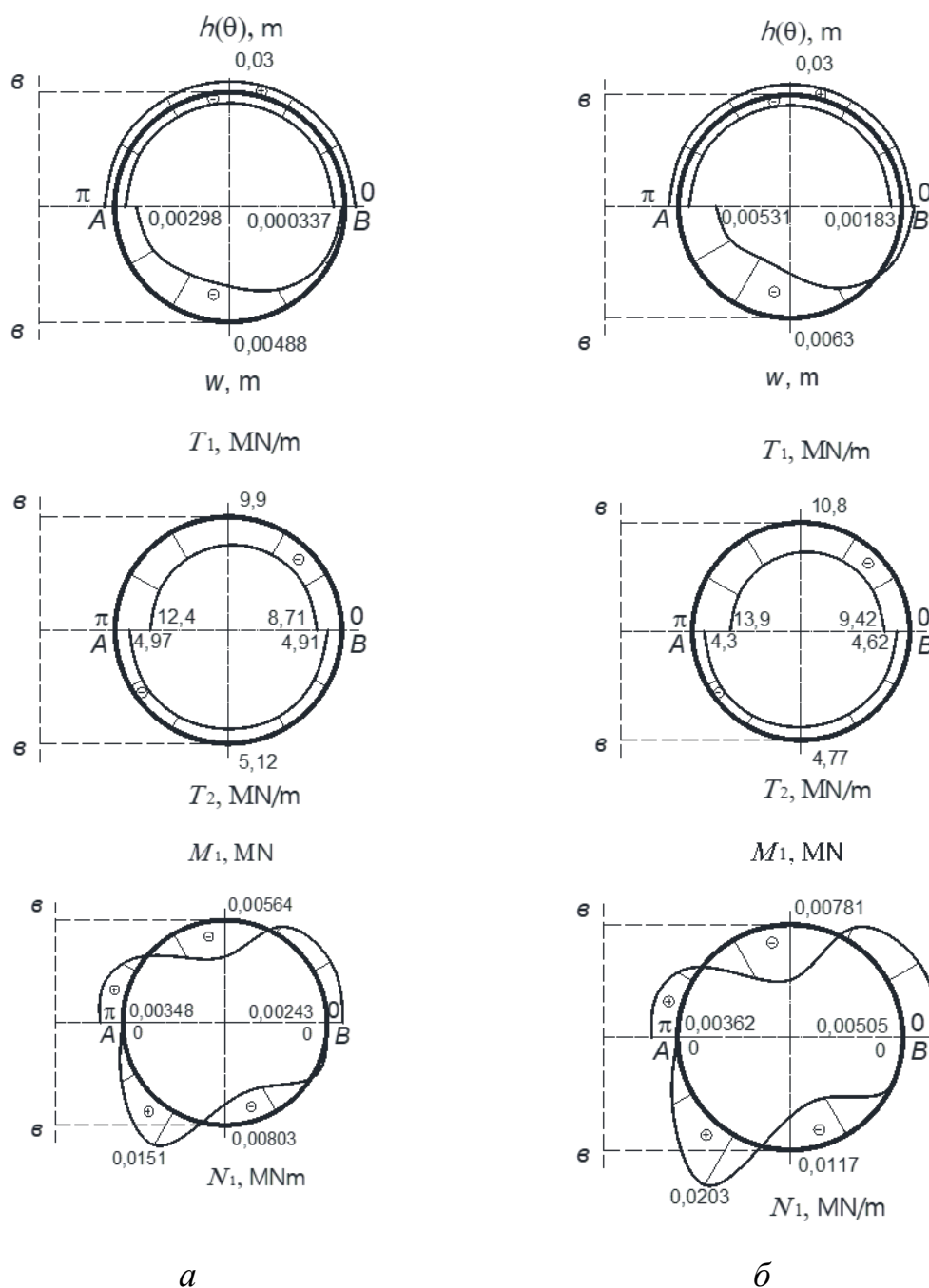


Рисунок 3.11 – Епюри розподілу товщин $h(\theta)$, прогинів $w(\theta)$, нормальних зусиль $T_1(\theta)$ і $T_2(\theta)$, згинаючого моменту $M_1(\theta)$ та перерізуючої сили $N_1(\theta)$, для спірально намотаних тороїдальних міцних корпусів ($a=1$ м, $k=0,33$) на глибині $H=1000$ м для ВП М35J/Ероху при ГСП (а) та при РСП (б)

Значення сумарних максимальних напружень серединної поверхні $\sigma_\theta(\theta)$ та $\sigma_\psi(\theta)$ (рис. 3.13-3.14) для тороїдальної оболонки залежать лише від погонних зусиль T_1 і T_2 , відповідно.

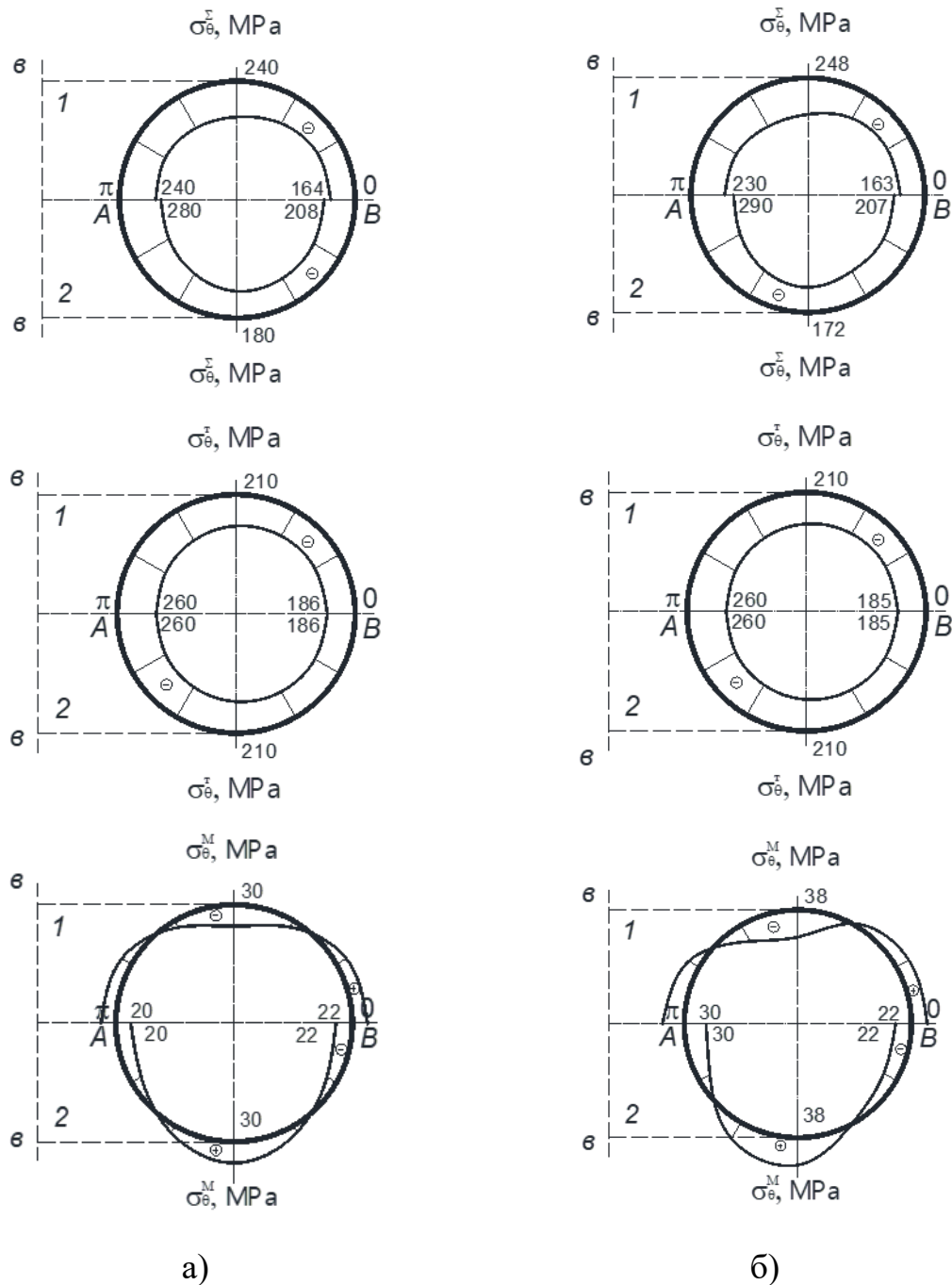


Рисунок 3.14 – Епюри розподілу напружень $\sigma_\theta(\theta)$ для спіральньо намотаних тороїдальних корпусів на зовнішній (1) та внутрішній (2) поверхнях оболонок ($a=1$ м, $k=0,33$) на глибині $H=1000$ м для СП S-2 GLASS/Ероху при ГСП (а) та при РСП (б)

Для СП напруження $\sigma_\theta(\theta)$ та $\sigma_\psi(\theta)$ майже не відрізняються для ГСН і РСН та становлять $\sigma_\theta^{max} = 260$ МПа, відповідно, та $\sigma_\psi^{max} = 105$ МПа для кожного виду намотування.

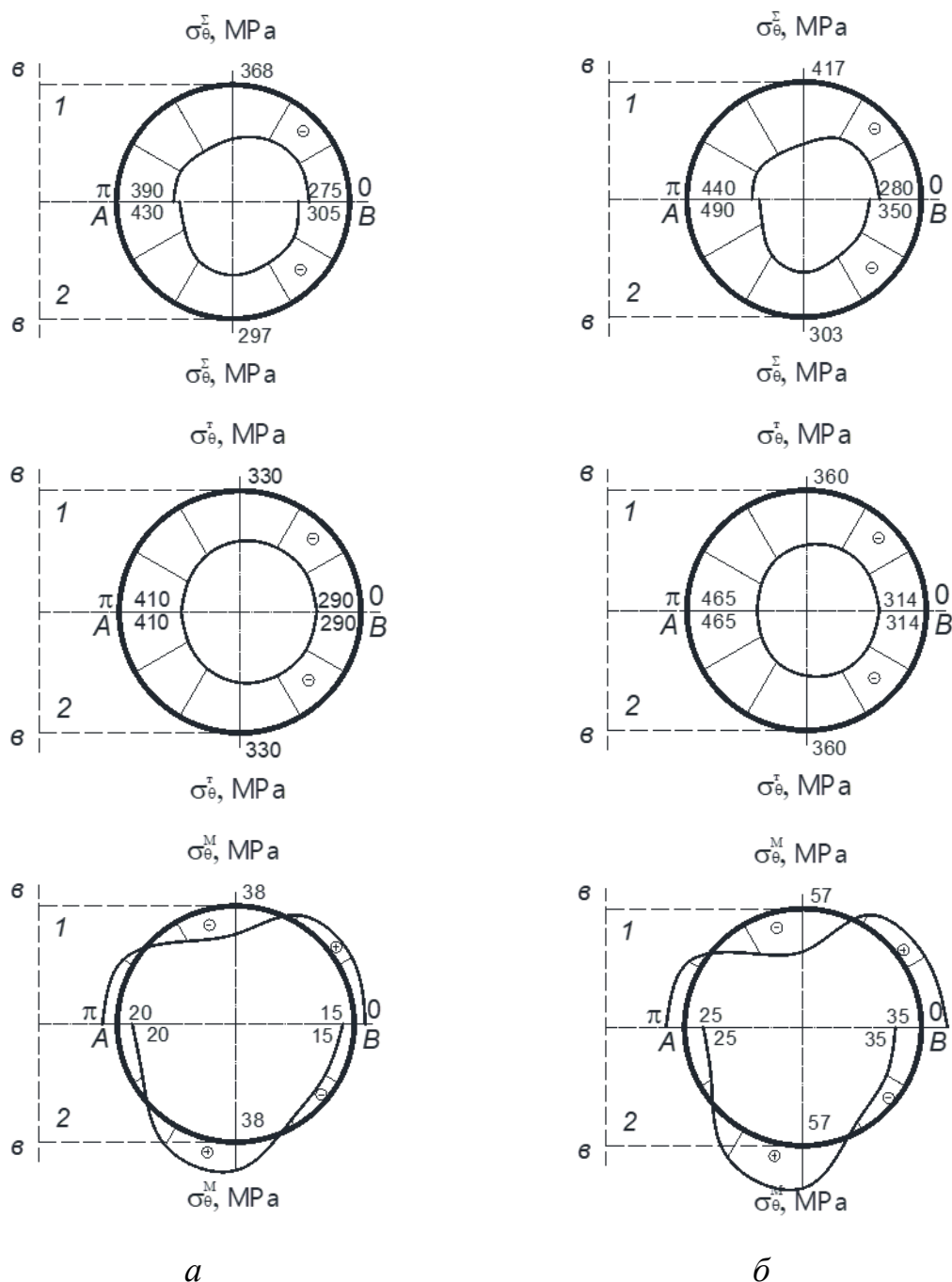


Рисунок 3.15 – Епюри розподілу напружень $\sigma_\theta(\theta)$ для спіральньо намотаних тороїдальних корпусів на зовнішній (1) та внутрішній (2) поверхнях оболонок ($a=1$ м, $k=0,33$) на глибині $H=1000$ м для ВП М35J/Ероху при ГСП (а) та при РСП (б)

В той же час для ВП максимальне напруження $\sigma_\theta(\theta)$ при ГСН менше ніж при РСН та складає 410 МПа та 465 МПа, відповідно, але – максимальне значення $\sigma_\psi(\theta)$ при ГСН (165 МПа) більше ніж при РСН (142 МПа). Тобто, для розвантаження меридіанного перерізу має сенс відмовитись від РСН, так як ГСН розвантажує меридіанний переріз. Так відбувається через те, що напружений стан за меридіанним перерізом суттєво не вісесиметричний (як у циліндра) через геометрію тора.

Максимальні значення напружень серединної поверхні $\sigma_\theta(\theta)$ (рис. 3.12-3.13) для тороїдальних міцних корпусів у всіх варіантах спостерігаються на внутрішньому екваторі в т. *A* ($\theta = \pi$), а для напружень $\sigma_\psi(\theta)$ спостерігаються на зовнішньому екваторі в т. *B* ($\theta = 0^\circ$). В той же час, для тороїдального міцного корпусу виконаного поперечним намотуванням в комбінації з повздовжньою намоткою (або викладкою) координати максимальних значень напружень серединної поверхні $\sigma_\theta(\theta)$ та $\sigma_\psi(\theta)$ розташовані на зовнішньому екваторі в т. *B* ($\theta = 0^\circ$) [52].

Моментна складова напруження σ_θ^M змінює свій знак (Рис.3.14-3.15) однаково для всіх варіантів.

Показано, що врахування моменту M_1 суттєво впливає на величину сумарних значень напружень $\sigma_\theta(\theta)$. Відхилення складає 15% для СП і 11,5% для ВП при ГСП та 18% для СП і 15,3% для ВП при РСН в районі $\theta = \pm\pi/2$.

Максимальне напруження σ_θ^Σ для всіх варіантів розташоване на внутрішній поверхні в районі полюса *A* та складає при $P_{кр}=10$ МПа для СП S-2 GLASS/Ероху $\sigma_\theta^{max} = 280$ МПа при ГСП та $\sigma_\theta^{max} = 290$ МПа при РСН, для ВП M35J/Ероху $\sigma_\theta^{max} = 430$ МПа при ГСП та $\sigma_\theta^{max} = 490$ МПа при РСН.

3.7 Висновки за розділом 3

1. Отримано аналітичну модель та метод розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності при гідростатичному стисканні міцного корпусу підводного апарату тороїдальної форми з врахуванням конструктивно-

технологічних факторів виготовлення із полімерних композиційних матеріалів, способом намотування волокном (стрічкою), який дозволяє виконувати оцінку міцності і жорсткості з врахуванням геометрії тора, властивостей компонентів композиційного матеріалу, особливостей схеми армування та змінної товщини оболонки.

2. З використанням метода Бубнова-Гальоркіна, вперше отримано аналітичні залежності для компонентів НДС при гідростатичному стисканні кругової замкненої тороїдальної оболонки на базі розрахункових моделей структури КМ зі змінною та осередненою товщиною в дискретній постановці.

3. Вперше, розроблено розрахунково-аналітичну методику розрахунку напружено-деформованого стану міцного корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з врахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення його із полімерних композиційних матеріалів, способом намотування волокном.

Результати даного розділу опубліковано в роботах [106-112, 114-121].

4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТОРОЇДАЛЬНОГО МІЦНОГО КОРПУСУ, ЩО ВИГОТОВЛЕНИЙ НАМОТУВАННЯМ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ, ПРИ ГІДРОСТАТИЧНОМУ СТИСКАННІ

Досліджується вплив структури композиційного матеріалу, параметрів армування та пружних характеристик композиційного матеріалу на розрахункові значення напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу при гідростатичному стисканні з використанням отриманої математичної моделі.

4.1. Вплив схеми намотування та врахування змінної товщини тороїдального міцного корпусу, що виготовлений намотуванням із полімерних композиційних матеріалів, на напружено-деформований стан, при гідростатичному стисканні

Проведено порівняльну оцінку ефективності розробленого методу розрахунку НДС на основі аналітичної моделі впливу гідростатичного тиску на міцний корпус тороїдальної форми для умов поперечного намотування в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) з осередненою постійною товщиною стінки в порівнянні з методом розрахунку з врахуванням змінної товщини вздовж меридіану з варіюванням кількості шарів в повздовжньому та поперечному напрямках. Варіювання кількості шарів відбувалось за допомогою параметра δ . Параметр δ показує, в скільки разів, в загальній товщині стінки композиційного матеріалу, поперечних шарів більше ніж повздовжніх – $\delta = (l_2 - l_1) / l_1$.

Проектні змінні в задачі: кількість односпрямованих шарів фіксованої товщини, що вкладаються в кожному із напрямків армування; властивості армуючого наповнювача – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона вуглецевих та скляних волокон. Напрямок армування обмежено поперечним

намотуванням з повздовжньою намоткою (або викладкою). Досліджуваний діапазон геометричних параметрів замкнутого кругового тора – $0 \leq k \leq 0,3$.

Відповідно до експериментальних даних [39, 84], товщина повздовжнього моношару зі СП складає $h_1^{\text{СП}} = 0,25 \cdot 10^{-3}$ м, з ВП – $h_1^{\text{ВП}} = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м.

На рис. 4.1-4.2 показано, що при збільшенні частини поперечних шарів в загальній масі оболонки міцного корпусу величина напружень $\sigma_\theta(\theta)$ зменшується на 13% для ВП та 12,6% для СП.

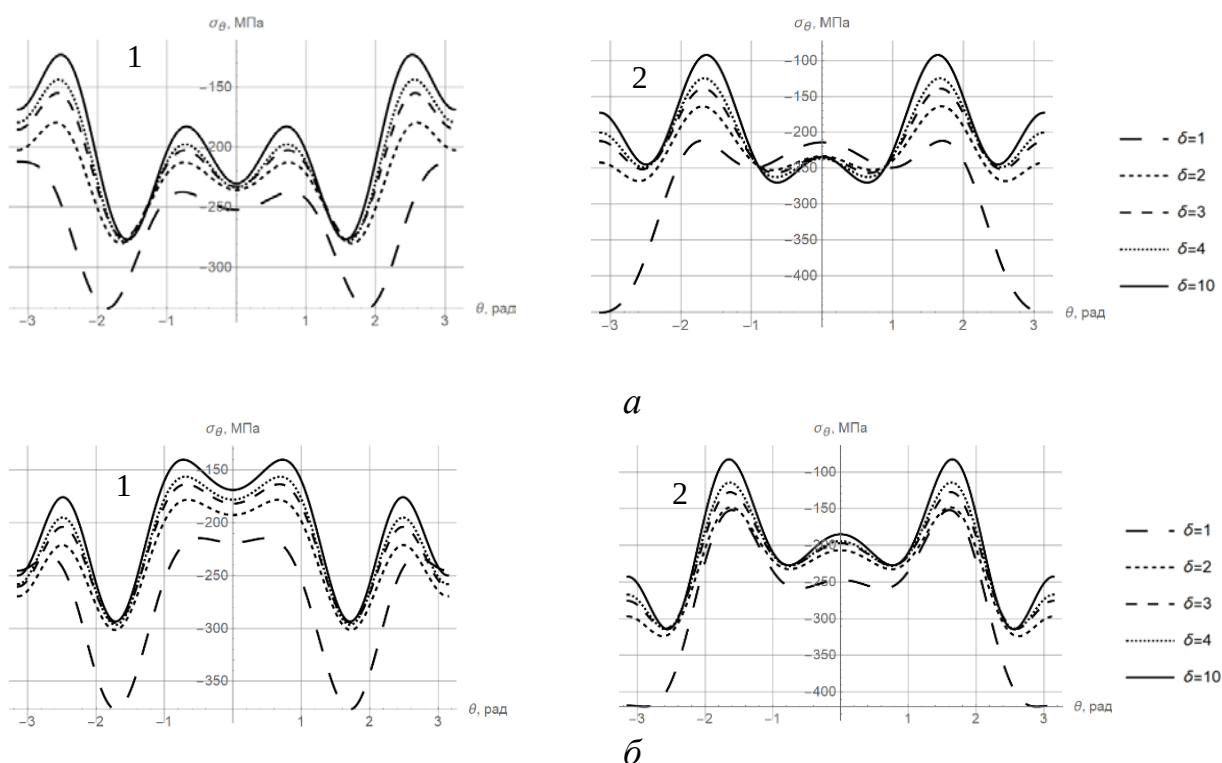


Рисунок 4.1 – Епюри розподілу напружень σ_θ для намотаних тороїдальних міцних корпусів ($a = 1$ м, $k = 1/3$) на зовнішній (1) та внутрішній (2) поверхнях на глибині $H = 1000$ м для вуглепластика М35J/Ероху: змінної товщини (а), осередненої товщини (б)

Виконана порівняльна оцінка розробленого методу розрахунку напружено-деформованого стану міцного корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з урахуванням

конструктивно-технологічних факторів виготовлення його способом намотування волокном із ПКМ на основі розрахункової моделі для поперечного намотування в комбінації з повздовжньою намоткою зі змінною товщиною уздовж меридіана з методом розрахунку, що на основі моделі з постійною товщиною стінки. Заміна тороїдальної оболонки з шарами змінної товщини на оболонку з осередненою товщиною шарів уздовж поперечного перерізу в отриманому методі розрахунку НДС призводить до зниження радіальних напружень $\sigma_\theta(\theta)$ на 20% (див. рис. 4.1-4.2).

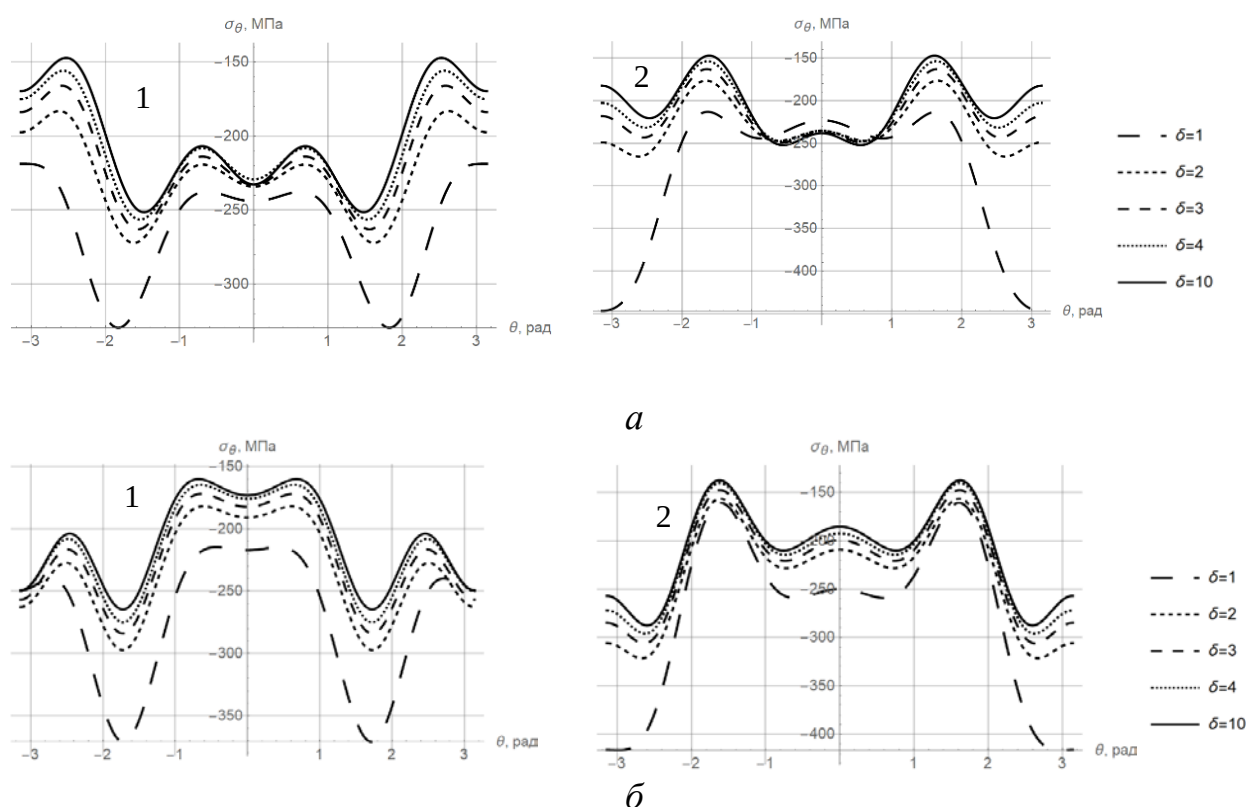


Рисунок 4.2 – Епюри розподілу напружень σ_θ для намотаних тороїдальних міцних корпусів ($a = 1$ м, $k = 1/3$) на зовнішній (1) та внутрішній (2) поверхнях на глибині $H = 1000$ м для вуглепластика СП S-2 GLASS/Ероху: змінної товщини (а), осередненої товщини (б)

4.2 Аналіз впливу пружних властивостей різних конструкційних матеріалів на величину прогину тороїдального міцного корпусу при гідростатичному стисканні

Виконано комплексне дослідження впливу структурних та механічних параметрів композиційних матеріалів, порядку розташування армуючих шарів, геометрії тороїдального міцного корпусу, отриманого методом поперечного намотування в комбінації з повздовжньою намоткою (або викладкою), на величину його прогину.

На рис.4.3-4.8 представлено залежності прогину w за координатою θ від k для тороїдальних корпусів зі СП та ВП однакової товщини з відносною товщиною $\Delta_m^{\text{СП}}=0,064$ і $\Delta_m^{\text{ВП}}=0,04$ [122]. Розглянуті тороїдальні оболонки отримані способом поперечного намотування в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою).

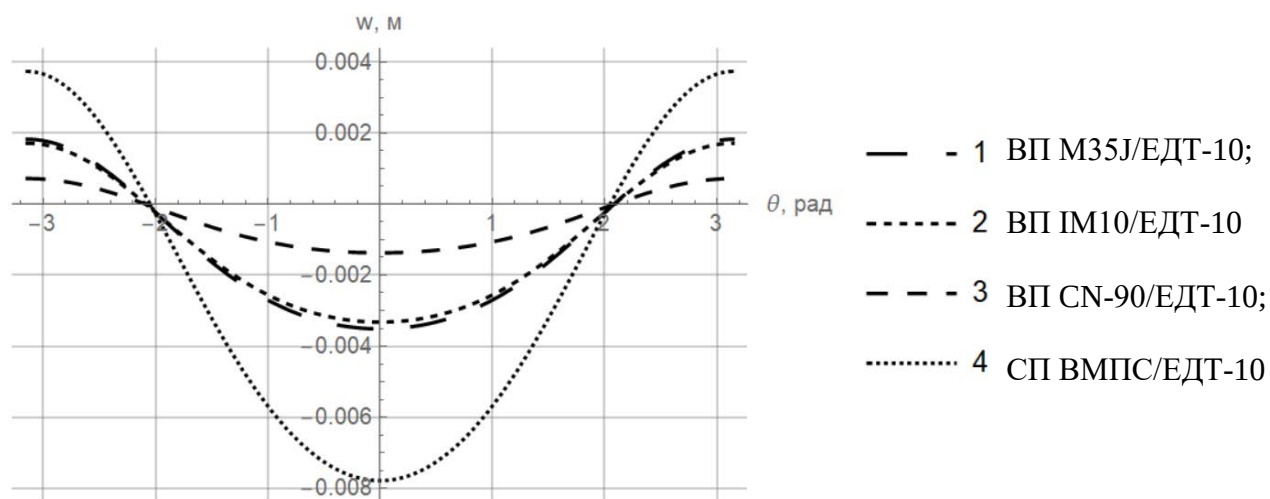


Рисунок 4.3 – Залежність прогинів $w(\theta)$ для тороїдальних міцних корпусів ($a = 1$ м, $H = 1000$ м) із СП та ВП, виготовлених поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) при $\Delta_m=0,1$, $k=0,1$

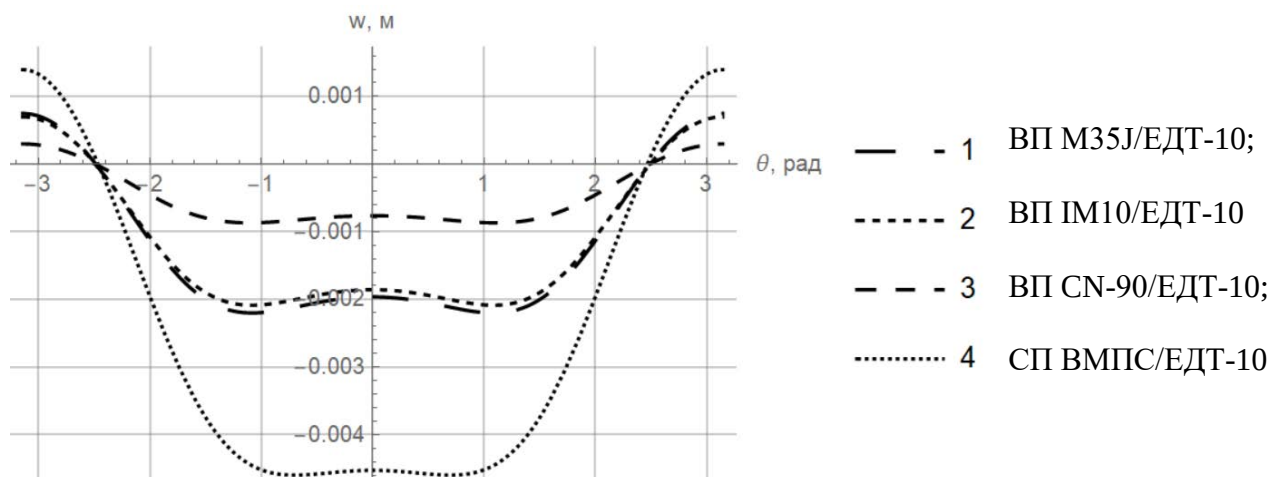


Рисунок 4.4 – Залежність прогинів $w(\theta)$ для тороїдальних міцних корпусів ($a = 1$ м, $H = 1000$ м) зі СП та ВП, виготовлених поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) при $\Delta_m=0,1$, $k=0,2$

На рис. 4.3-4.5 чітко видно, як зі збільшенням значення коефіцієнта k змінюється форма прогину $w(\theta)$. Спостерігається зменшення значення прогину районі $\theta=0$.

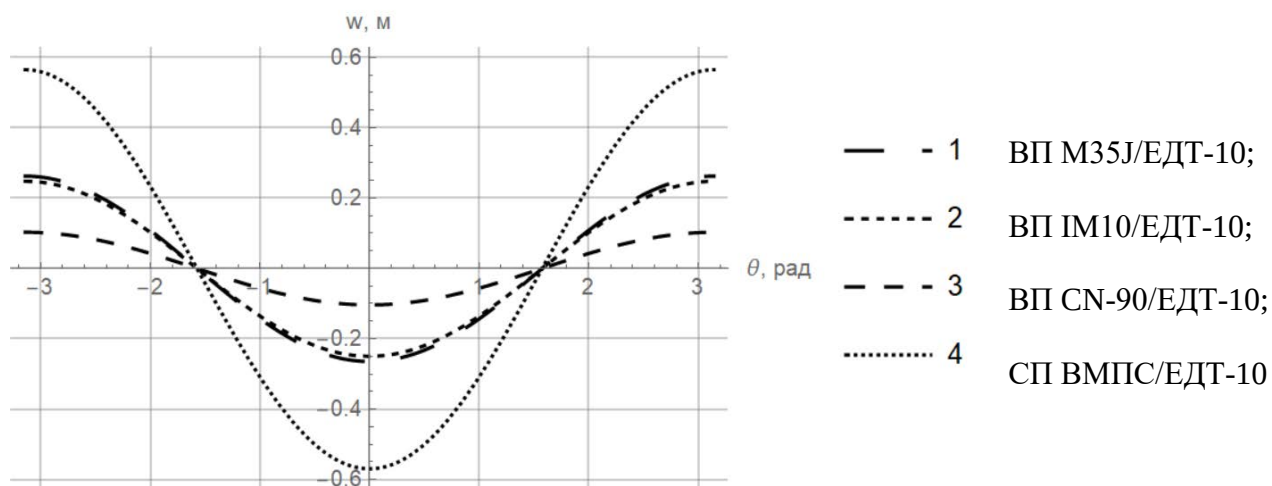


Рисунок 4.5 – Залежність прогинів $w(\theta)$ для тороїдальних міцних корпусів ($a = 1$ м, $H = 1000$ м) зі СП та ВП, виготовлених поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) при $\Delta_m=0,1$, $k=0,001$.

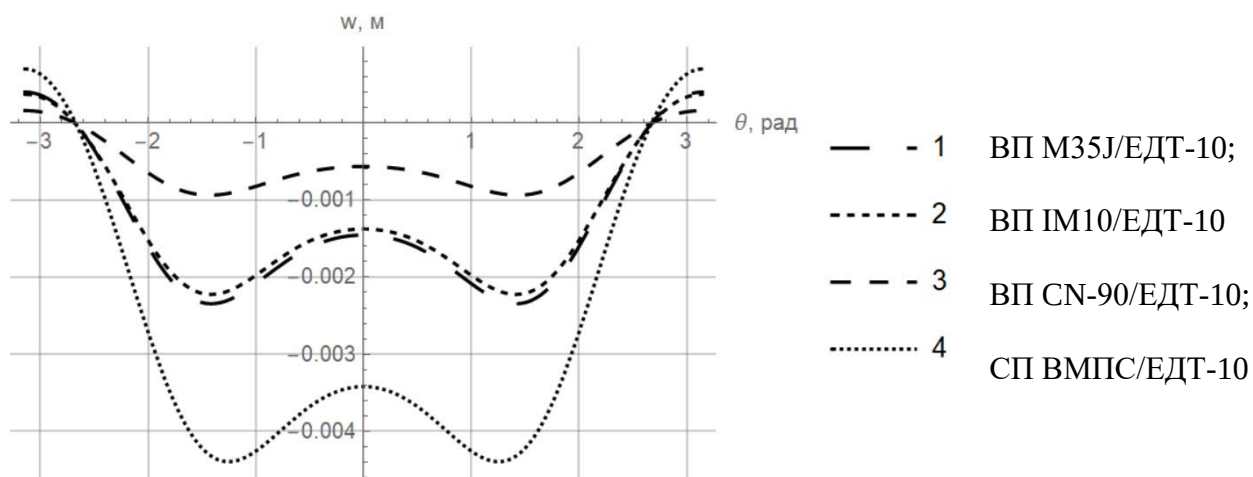


Рисунок 4.6 – Залежність прогинів $w(\theta)$ для тороїдальних міцних корпусів ($a = 1$ м, $H = 1000$ м) зі СП та ВП, виготовлених поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) при $\Delta_m=0,1$, $k=0,3$

При порівнянні прогинів $w(\theta)$ з $k=0,1$ та $k=0,5$ спостерігається зменшення майже на 50% в районі $\theta=0$, збільшення на 20% в районі $\theta=\pm\pi/2$ та зменшення на 90% в районі $\theta=\pi$.

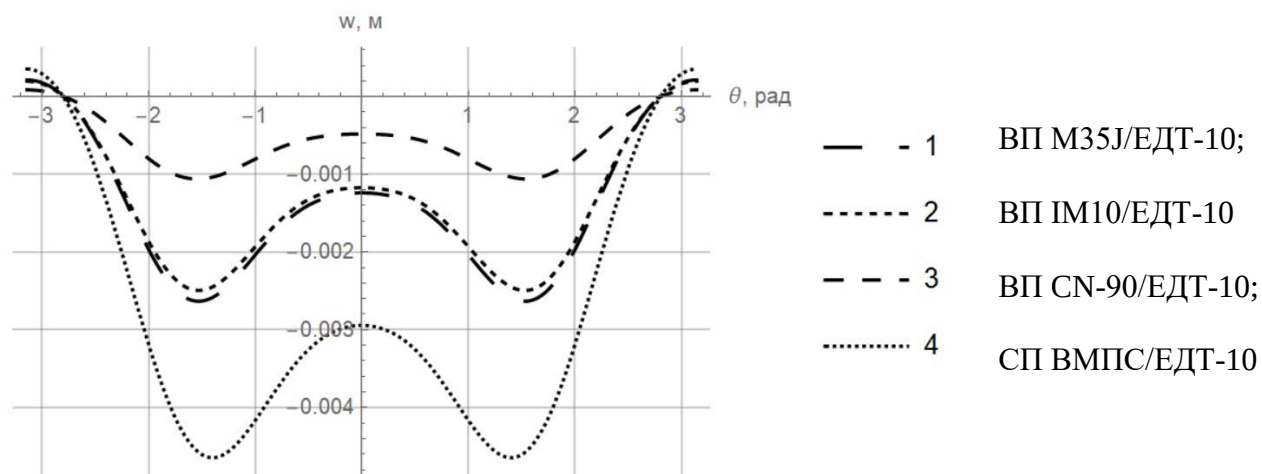


Рисунок 4.7 – Залежність прогинів $w(\theta)$ для тороїдальних міцних корпусів ($a = 1$ м, $H = 1000$ м) зі СП та ВП, виготовлених поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) при $\Delta_m=0,1$, $k=0,4$

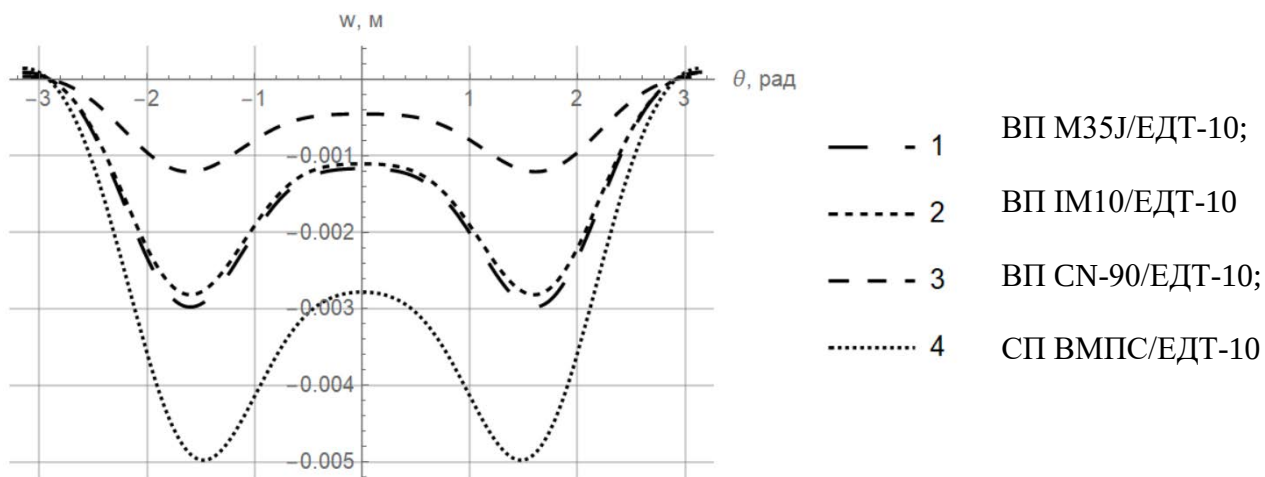


Рисунок 4.8 – Залежність прогинів $w(\theta)$ для тороїдальних міцних корпусів ($a = 1$ м, $H = 1000$ м) зі СП та ВП, виготовлених поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) при $\Delta_m=0,1$, $k=0,5$

Порівняння прогинів $w(\theta)$ для тороїдальних міцних корпусів (див. рис. 4.9) зі СП та ВП з традиційно застосовуваними нині металами (міцні корпуси розраховувались як ізотропні оболонки змінної товщини в меридіанному перерізі) для міцних корпусів, таких як, високоміцна сталь (АК-25 [123]), титанові сплави (марки ВТ [124]) і алюмінієві сплави (марки В95 [125]). Порівняння показало, що тороїдальний МК із ВП на основі надвисокомодульних волокон ($E_B=860$ ГПа) майже не поступається сталі та титановим сплавам. При цьому густина ВП в 4,3 рази менша за густину сталі і в 2,5 рази менша за густину титанового сплаву. Цей факт робить намотаний тороїдальний міцний корпус більш легким та технологічним в порівнянні з традиційними матеріалами. Тому тороїдальний міцний корпус виготовлений методом намотування із ПКМ має істотні переваги перед аналогічним міцним корпусом із металу

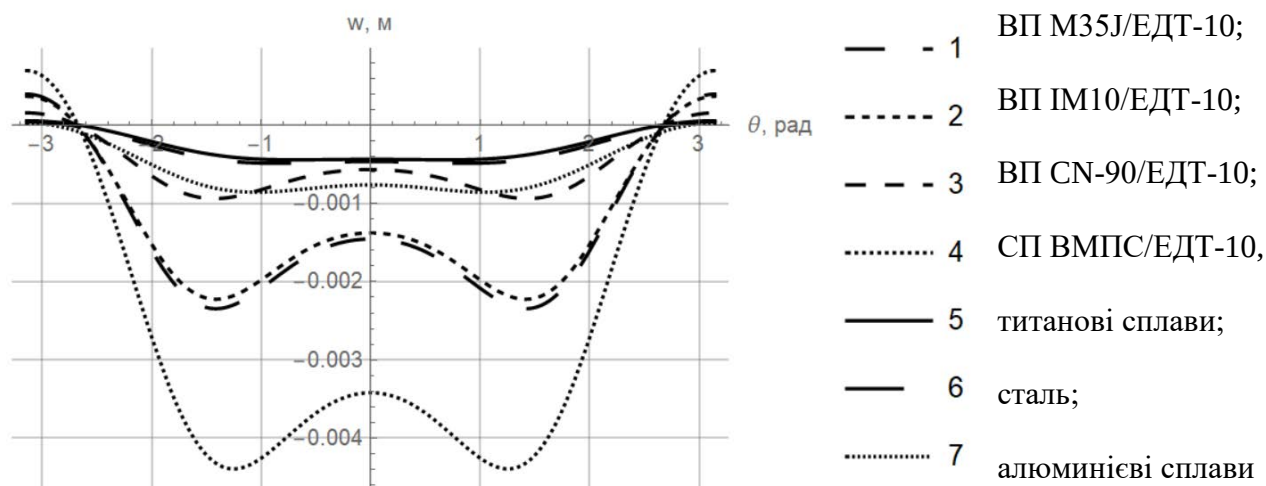


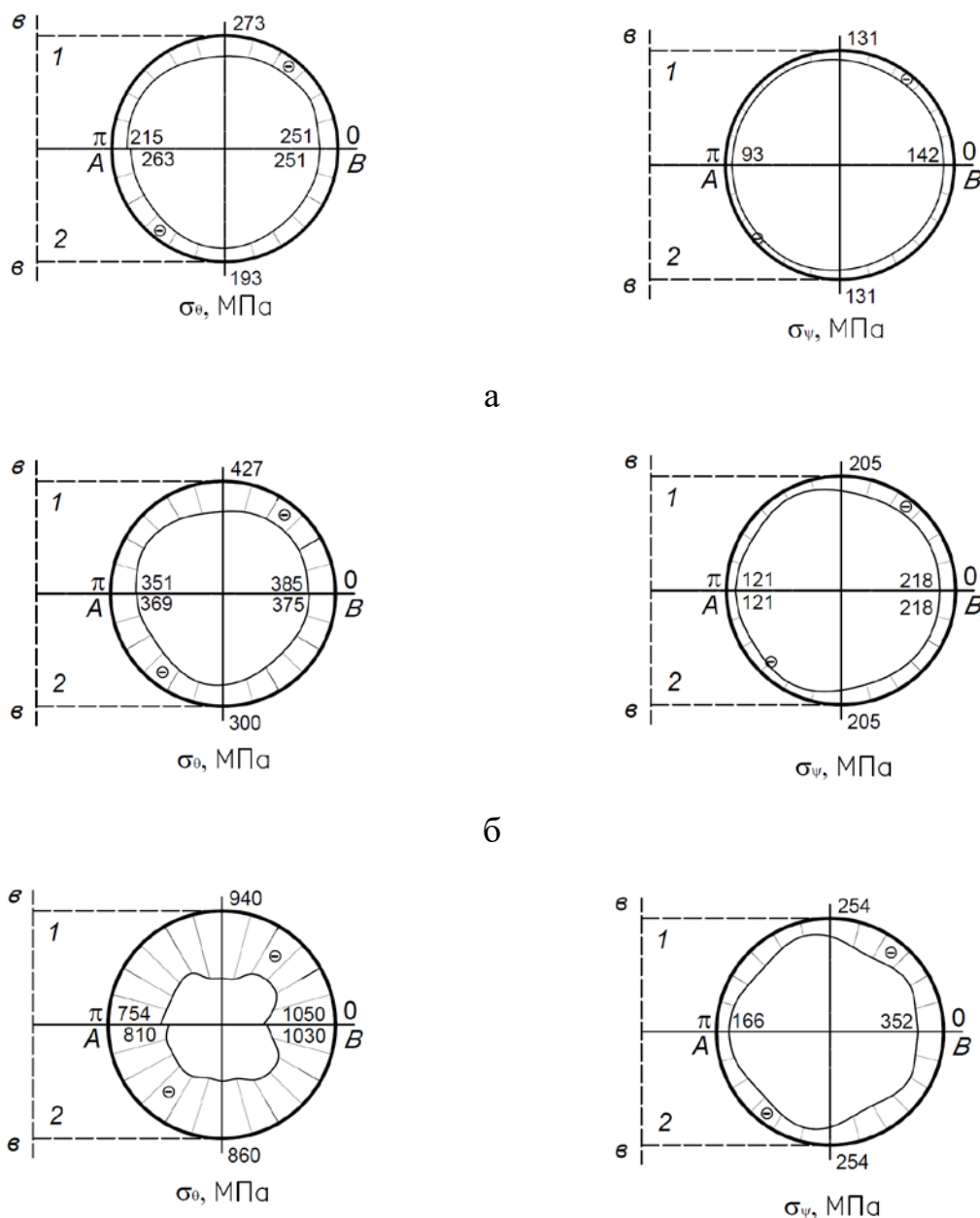
Рисунок 4.9 – Залежність прогинів $w(\theta)$ для тороїдальних міцних корпусів ($a = 1$ м, $H = 1000$ м) зі СП, ВП та традиційних конструкційних матеріалів, виконаних поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) при $\Delta_m=0,1$, $k=0,3$

4.3 Порівняльний аналіз методів розрахунку НДС

Проведено порівняння розробленого методу розрахунку міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з урахуванням конструктивно-технологічних факторів його виготовлення із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волокном з методом [98], що враховує теоретичну оцінку пружних характеристик за Фойхтом і Рейсом, та базується на безмоментному розв'язку Фепля.

На основі розробленого методу було побудовано епюри мембранних зусиль для міцних корпусів тороїдальної форми при $k=0,33$, для матеріалів: СП S-2 GLASS/Ероху; ВП М35J/Ерохі; ВП CN-90/Ерохі, для робочих глибин 1000 м та 3000 м. Отримані данні представлено на рис. 4.10 та 4.11.

Оболонки міцних корпусів виготовлені поперечним намотуванням в комбінації із повздовжньою намоткою та товщиною, що задовольняє умову стійкості по верхньому критичному тиску



а

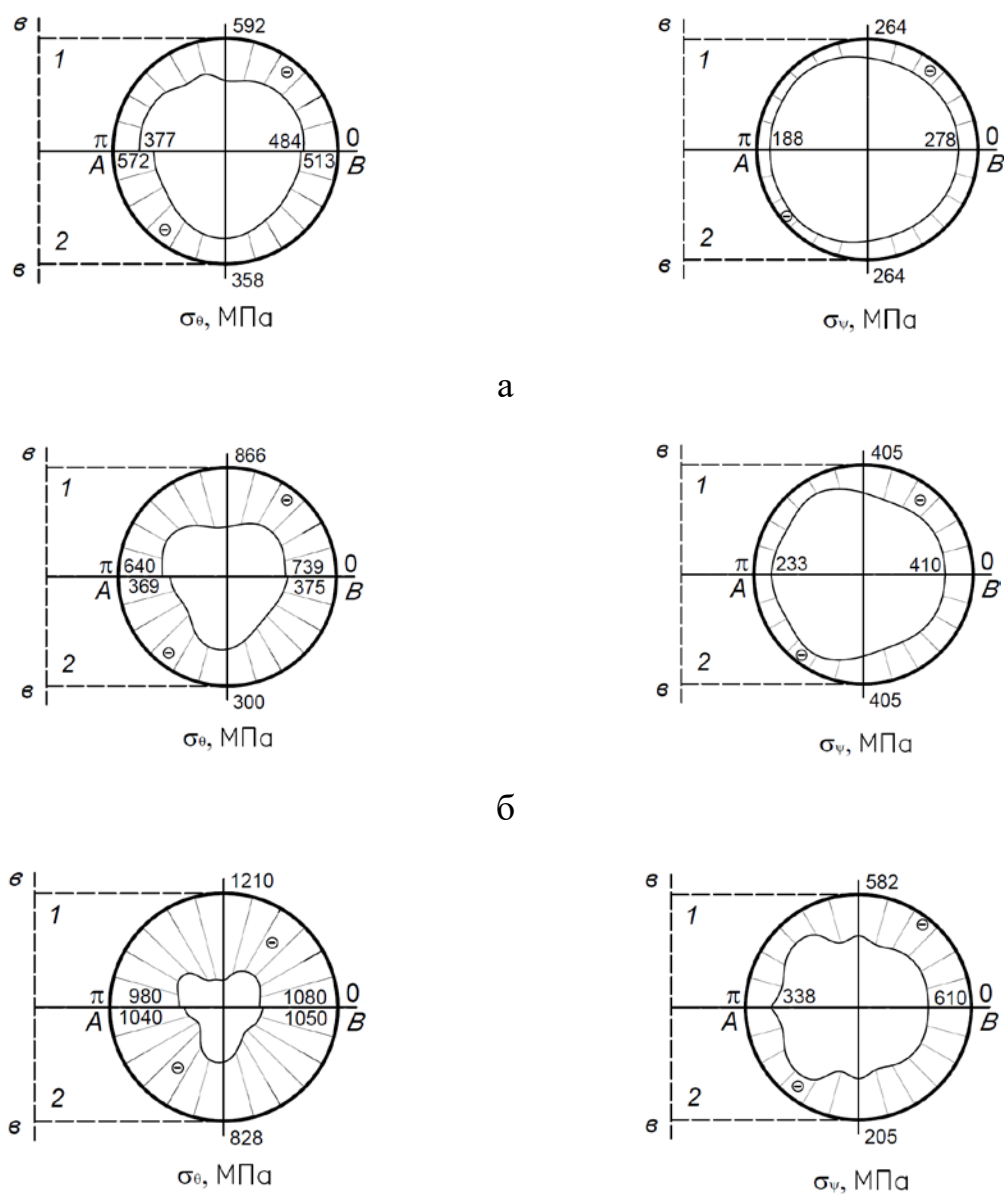
б

в

Рисунок 4.10 – Епюри напружень $\sigma_\theta(\theta)$, $\sigma_\psi(\theta)$ від мембранних зусиль для тороїдальних корпусів ($k=1/3$) на зовнішній (1) та внутрішній (2) поверхнях на глибині $H_{SW}=1000$ м: СП S-2 GLASS/Ероху (а); ВП М35J/Ерохі (б); ВП CN-90/Ерохі (в)

Виконана порівняльна оцінка розробленого методу розрахунку напружено-деформованого стану міцного корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з урахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення його способом

намотування волокном із ПКМ на основі розрахункової моделі зі змінною товщиною уздовж меридіана з методом розрахунку, що базується на теоретичній оцінці пружних характеристик та використовує безмоментне рішення Фепля.



в

Рисунок 4.11 – Епюри напружень $\sigma_\theta(\theta)$, $\sigma_\phi(\theta)$ від мембранних зусиль для тороїдальних корпусів ($k=1/3$) на зовнішній (1) та внутрішній (2) поверхнях на глибині $H_{SW}=3000$ м: СП S-2 GLASS/Ероху (а); ВП М35J/Ерохі (б); ВП CN-90/Ерохі (в)

Встановлено, що використання другої методики призводить до заменшення напружень в два рази, а це в свою чергу призводить до помилки в небезпечну сторону.

4.4 Висновки за розділом 4

1. Отримано наукові дані про вплив схеми армування, геометричних параметрів корпусу, характеристик перспективних марок армуючих наповнювачів та сполучника, змінної товщини та її осереднення в намотаному тороїдальному корпусі на величину напружень з використанням чисельного аналізу пружних характеристик шаруватого композиційного матеріалу. Результати параметричних досліджень представлено у вигляді графіків залежності прогинів $w(\theta)$ та напружень $\sigma_\theta(\theta)$, $\sigma_\psi(\theta)$ від впливу структури композиційного матеріалу, параметрів армування та його пружних характеристик.

2. Встановлено, що заміна розрахункової моделі тороїдальної оболонки зі структурою шаруватого матеріалу з шарами змінної товщини на модель оболонки з осередненою постійною товщиною шарів вздовж меридіану призводить до зниження значень максимальних напружень в небезпечних точках до 20%.

3. Проведено порівняльну оцінку результатів розрахунку напружень в небезпечних точках поперечного перетину тороїдальної оболонки з вуглепластика та зі склопластика, отриманих поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) та традиційних матеріалів для міцних корпусів підводних технічних засобів (сталі, титанового та алюмінієвого сплавів). Показано, що намотаний тороїдальний міцний корпус із ВП є більш легким та технологічним в порівнянні з традиційними матеріалами.

4. Проведено порівняльний аналіз методу розрахунку напружено-деформованого стану для міцних корпусів тороїдальної форми з урахуванням

практичних рекомендацій Beuro Veritas з методом, що враховує теоретичну оцінку пружних характеристик за Фойхтом і Рейсом, та базується на безмоментному розв'язку Фепля. Встановлено, що використання спрощеної методики призводить до зменшення напружень в два рази, а отже виникнення похибки в небезпечну сторону.

Результати даного розділу опубліковано в роботах [126-127].

5 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МІЦНОГО КОРПУСУ ПІДВОДНОГО АПАРАТУ ТОРОЇДАЛЬНОЇ ФОРМИ ВИГОТОВЛЕНОГО СПОСОБОМ НАМОТУВАННЯ НА ПОЧАТКОВИХ СТАДІЯХ ПРОЕКТУВАННЯ

5.1 Аналіз впливу фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів та геометрії міцного корпусу тороїдальної форми на його масогабаритні показники з позиції умови міцності

Головна задача проектувального розрахунку міцного корпусу для підводної техніки полягає в створенні раціональної оболонкової конструкції, яка має в поєднанні з необхідною міцністю і стійкістю найменшою масою. Вимога мінімальної ваги особливо важлива для міцного корпусу в підводних апаратах. При порівнянні декількох міцних корпусів з однаковими глибинами занурення та рівними об'ємами найкращим слід вважати міцний корпус, що має найменше m_{MK}/m_w .

Розглядається вплив армуючого матеріалу (див. табл. 2.1) та геометрії тору ($0,143 \leq k \leq 0,33$) на масогабаритні показники тороїдальних міцних корпусів, виконаних поперечним намотуванням в комбінації з повздовнім намотуванням (або викладкою), при обмеженні за міцністю, з використанням методу розрахунку міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з урахуванням конструктивно-технологічних факторів його виготовлення із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волокном.

Співвідношення маси тороїдального міцного корпусу m_{MK} до його водотоннажності m_w розраховано за формулами [104]:

$$m_{MK} = 4 \pi^2 a R \rho h_m; \quad (5.1)$$

$$m_w = 2 \pi^2 (a + h_m) R \rho_w; \quad (5.2)$$

$$\frac{m_{MK}}{m_w} = 2 \frac{a h_m \rho}{a + h_m \rho_w}; \quad (5.3)$$

де ρ – густина матеріалу корпусу, кг/м^3 ;

ρ_w – густина морської води ($\rho_w=1027 \text{ кг/м}^3$ [128]);

h_m – осереднена за меридіаном тороїдального корпусу товщина $h(\theta, k)$, $h_m = \text{const}$.

Осереднена за меридіаном намотаної тороїдальної оболонки із вуглепластика та склопластика товщина h_m в формулі (5.3) визначається з використанням розв'язку для визначення напружено-деформованого стану на основі моделі розрахунку намотаної тороїдальної оболонки змінної товщини з поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) при обмеженні на глибину занурення, деталізується структура, що передбачає певну кількість поперечних та повздовжніх шарів. Шаруватий пакет композиційного матеріалу з осередненими за меридіаном товщинами поперечних шарів визначається для кожного значення глибини занурення з отриманням товщини h_m .

Для розрахунку співвідношення m_{MK}/m_w використовувалась система Махіта. Результати розрахунків представлено в графічному вигляді на рис. 5.1-5.4 для матеріалів, які вказано в таблиці 2.2.

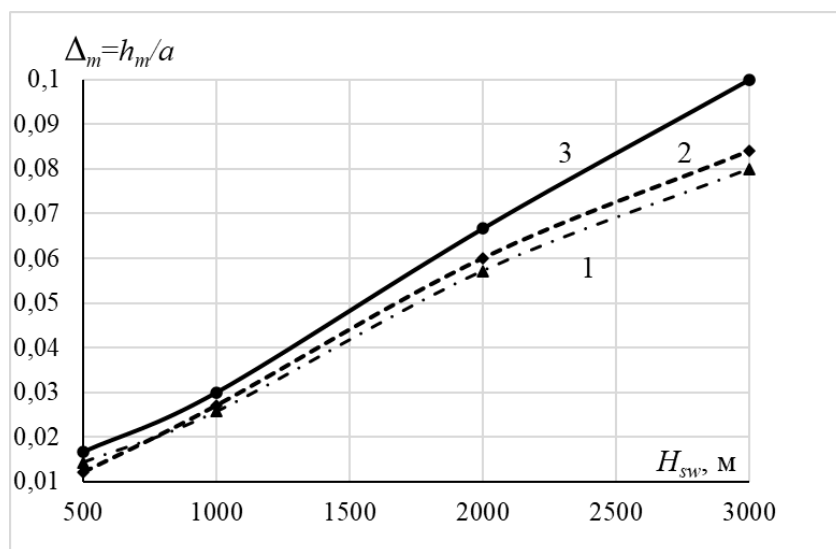


Рисунок 5.1 – Залежність відносної товщини $\Delta_m = h_m/a$ міцного корпусу тороїдальної форми змінної товщини, виготовленого поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням із СП (S-2 GLASS/ЕДТ-10), від робочої глибини занурення при $k=0,143$ (1); 0,2 (2); 0,33 (3)

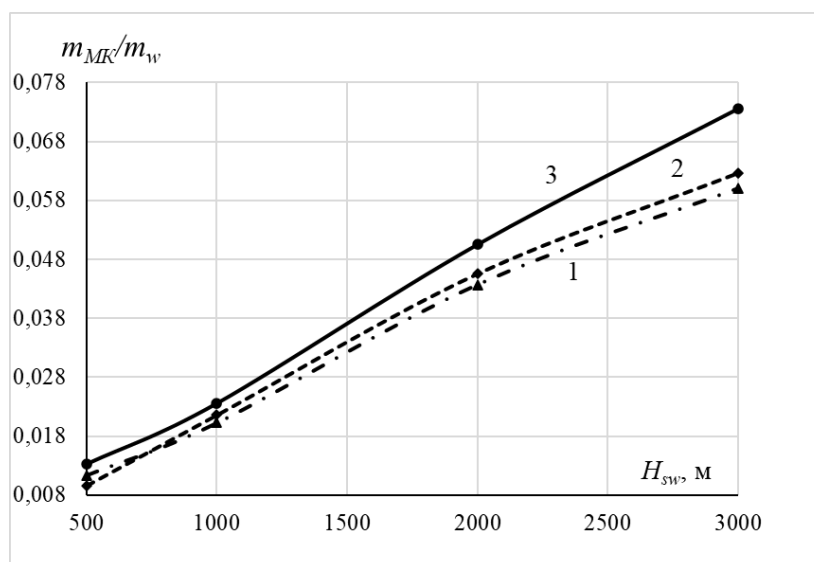


Рисунок 5.2 – Залежність відносної маси m_{MK}/m_w міцного корпусу тороїдальної форми змінної товщини, виготовленого поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням зі СП (S-2 GLASS/ЕДТ-10), від робочої глибини занурення при $k=0,143$ (1); $0,2$ (2); $0,33$ (3)

З аналізу отриманих результатів можна зробити ряд висновків: для міцних корпусів тороїдальної форми, виготовлених поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою), зі збільшенням k , середня товщина, а відповідно і відношення m_{MK}/m_w збільшуються.

У апаратів, які призначені для використання на малих глибинах товщину міцного корпусу вибирають, в першу чергу, з конструктивних та технологічних міркувань без чіткої залежності від глибини.

Склопластик без збільшення модуля пружності скляних волокон можна визнати неефективним, через необхідність збільшення товщини оболонки зі збільшенням проектної глибини занурення (див. рис. 5.1). В той же час, через технологічні особливості, при товщині стінки намотаного виробу вище 80 мм, важко забезпечити стабільність міцнісних властивостей готового виробу. [31]

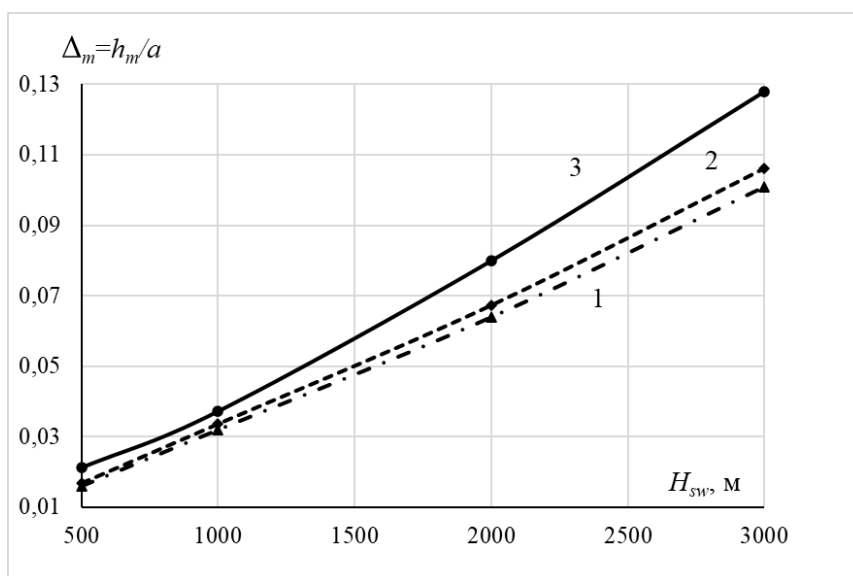


Рисунок 5.3 – Залежність відносної товщини $\Delta_m = h_m/a$ міцного корпусу тороїдальної форми змінної товщини, виготовленого поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням з ВП (М35J/ЕДТ-10), від робочої глибини занурення при $k=0,143$ (1); 0,2 (2); 0,33 (3)

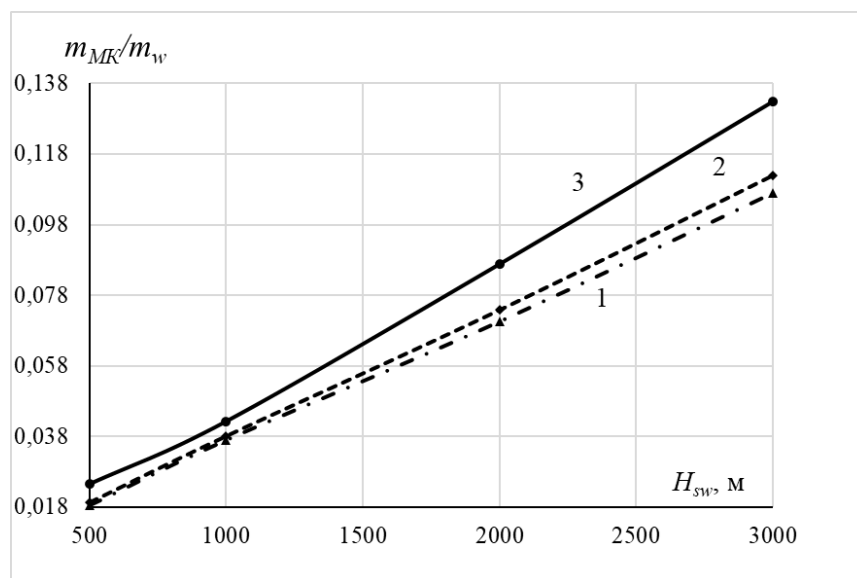


Рисунок 5.4 – Залежність відносної маси m_{MK}/m_w міцного корпусу тороїдальної форми змінної товщини, виготовленого поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням зі СП (М35J/ЕДТ-10), від робочої глибини занурення при $k=0,143$ (1); 0,2 (2); 0,33 (3)

Розглянуто вплив фізико-механічних властивостей матеріалів, які традиційно використовуються для міцних корпусів підводних технічних засобів, таких як: сталь, титанові та алюмінієві сплави; КМ – вуглепластик та склопластик, отримані поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням та викладкою, на масогабаритні показники (m_{MK}/m_w і Δ_m) міцних корпусів тороїдальної форми кругового поперечного перерізу з $k=0,143$ та $k=0,33$ (рис. 5.5 – 5.6).

Для намотаного міцного корпусу в формі тору з вуглепластика та склопластика з $k=0,33$ використано схему армування з однаковою кількістю повздовжніх та поперечних шарів.

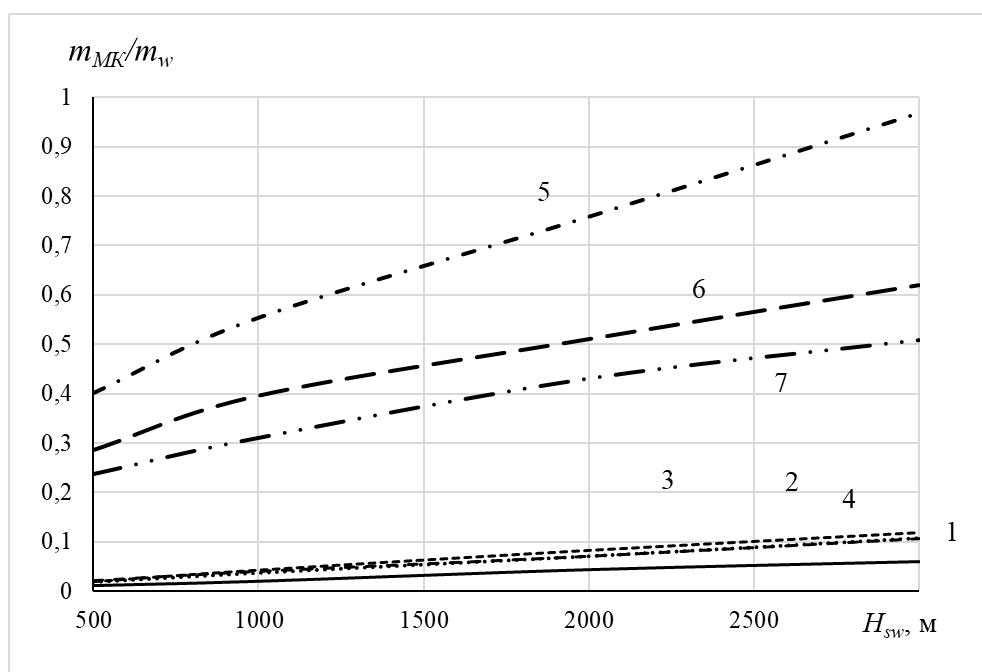


Рисунок 5.5 – Залежність відносної маси m_{MK}/m_w міцного корпусу ($k=0,143$) тороїдальної форми змінної товщини із різних конструкційних матеріалів від робочої глибини занурення:

1 – СП ВМПС/ЕДТ-10; 2 – ВП М35J/ЕДТ-10; 3 – ВП CN-90/ЕДТ-10; 4 – ВП ІМ10/ЕДТ-10, 5 – сталь, 6 – титанові сплави, 7 – алюмінієві сплави

Відповідно до отриманих графічних даних (рис 5.5 – 5.6) випливає, що тороїдальний міцний корпус з ВП має найнижче співвідношення m_{MK}/m_w в порівнянні зі склопластиком та іншими матеріалами, що використовуються в

підводному суднобудуванні, а відповідно – має більшу позитивну плавучість. Чим вище вага матеріалу міцного корпусу або корпусів підводних технічних засобів, обладнання, яке розміщується всередині корпусу та ззовні, тим більше потрібно додаткової плавучості, в якості якої на сьогодні використовується синтактна піна з густиною 500...600 кг/м³. Використання великої кількості елементів плавучості збільшує габарити підводного апарату, а це не сприяє збільшенню швидкості руху апарату під водою та зменшує його маневренність.

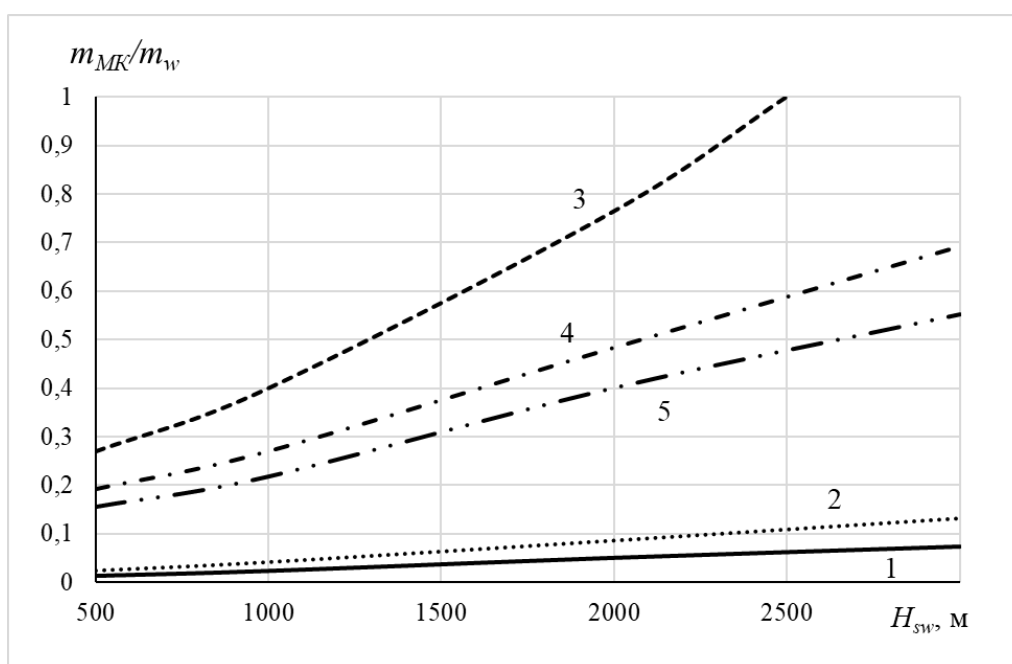


Рисунок 5.6 – Залежність відносної маси m_{MK}/m_w міцного корпусу ($k=0,33$) тороїдальної форми змінної товщини із різних конструкційних матеріалів від робочої глибини занурення:

1 – СП ВМПС/ЕДТ-10; 2 – ВП М35J/ЕДТ-10; 3 – сталь; 4 – титанові сплави; 5 – алюмінієві сплави

Для міцних корпусів тороїдальної форми однакової водотонажності з $k=0,33$ (див. рис. 5.6) розрахунки проведено для умов виготовлення поперечним намотуванням в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою). Відповідно до отриманих кривих роль поперечного підсилення незначна для волокнистих КМ як з низькомодульним, так і високомодульним наповнювачем і різниця між m_{MK}/m_w не перевищує 5%.

В сучасних підводних човнах співвідношення m_{MK}/m_w не повинно перевищувати 23%. Відповідно до рис. 5.6, цьому відповідають 2 конструкційних матеріали із розглянутих – вуглепластики М35J/ЕДТ-10 та CN-90/ЕДТ-10.

Технологія виготовлення тороїдальних міцних корпусів із металів передбачає виготовлення зварної конструкції, тому – співвідношення m_{MK}/m_w для зварного корпусу із легованої сталі, титанового та алюмінієвого сплавів буде більше розрахункового.

Технологія виготовлення міцних корпусів тороїдальної форми способом намотування, завдяки якій корпус може бути виготовлено повністю, та використання полімерних композиційних матеріалів з високою питомою міцністю та жорсткістю здатні зменшити m_{MK}/m_w .

5.2 Оцінка техніко-економічної ефективності використання вуглепластика та склопластика для міцних корпусів підводних апаратів тороїдальної форми

Використовуючи методику, що розроблена В.М. Грековим [129], без детального опрацювання всього проекту, надано оцінку техніко-економічної ефективності використання різних матеріалів для міцного корпусу тороїдальної форми з врахуванням їх вартості та жорсткості (рис. 5.7) при забезпеченні міцності та стійкості.

Економічна ефективність використання різних матеріалів для міцного корпусу тороїдальної форми може бути розрахована:

$$E_{MK} = \frac{1 - \frac{m_{MK}}{m_w}}{\frac{m_{MK}}{m_w} C_{MK}}$$

де C_{MK} – порівняльний коефіцієнт за вартістю одиниці маси використаних матеріалів в корпусі (табл. 5.1) [129].

Таблиця 5.1 – Порівняльні дані за вартістю різних матеріалів за 1 кг по відношенню до сталі $\sigma_{0,2}=320$ МПа.

Порівняльний коефіцієнт	Сталь		Титановий сплав $\sigma_{0,2}=600-800$ МПа	СП із високоміцного скловолокна	ВП $E_{ВП}=275-345$ ГПа
	$\sigma_{0,2}=320$ МПа	$\sigma_{0,2}=800-900$ МПа			
$C_{МК}$	1	9,8	≈ 50	9,2	24,3

Порівняння даних за вартістю різних матеріалів (див. табл. 5.1) виконано відносно вартості 1 кг сталі $\sigma_{0,2}=320$ МПа, оскільки вартість корпусних матеріалів з часом змінюється.

Для робочих глибин 3000 м за вартістю та співвідношенню $m_{МК}/m_w$, при обмежені за міцністю доцільно вибирати ВП на основі висоміцних вуглецевих волокон (ВП $E_{ВП}=275-345$ ГПа).

Вартість намотаного тороїдального корпусу із ВП на основі середніх за модулем високоміцних волокон в 1,3 рази більша за вартість корпусу зі СП.

Вибір армуючого матеріалу, що забезпечує мінімальну масу та максимум несучої здатності корпусу, є достатньо неоднозначною задачею. При проектуванні тороїдальних міцних корпусів для підводної техніки слід звертати увагу на узгоджене підвищення як міцності, так і жорсткості односпрямованого ПКМ.

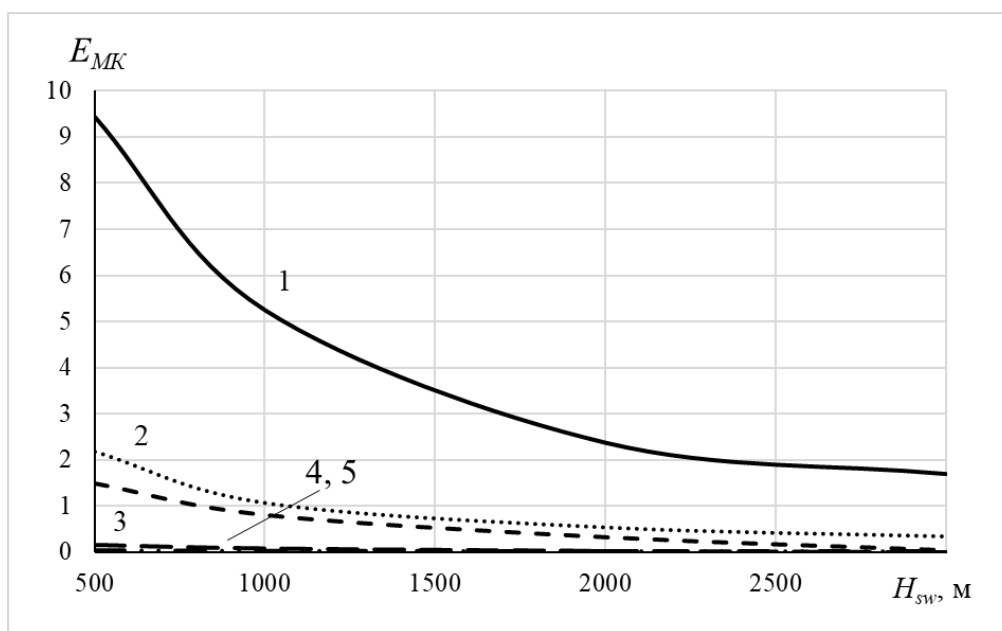


Рисунок 5.7 – Залежність відносної маси m_{MK}/m_w міцного корпусу ($k=0,143$) тороїдальної форми змінної товщини із різних конструкційних матеріалів від робочої глибини занурення:

1 – СП ВМПС/ЕДТ-10; 2 – ВП М35J/ЕДТ-10;

3 – сталь ($\sigma_{0,2}=320$ МПа); 4 – сталь ($\sigma_{0,2}=800-900$ МПа); 5 – титанові сплави

Представлення в графічному вигляді порівняння ефективності різних матеріалів при обмеженні за міцністю дозволяють зробити однозначний вибір на користь того або іншого матеріалу в якості конструкційного для міцного корпусу тороїдальної форми на попередньому етапі проектування. [130]

Для оцінки ефективності міцного корпусу, отриманого іншими схемами намотування, відповідно до запропонованого в роботі алгоритму, необхідно проводити повний аналіз впливу всього масиву параметрів проектування – геометрії тору, типу структури та типу компонентів ПКМ врахуванням конструктивно-технологічних обмежень при виготовленні тороїдального міцного корпусу способом намотування, що дозволить сформувати раціональну структуру стінки корпусу із ПКМ для забезпечення його максимальної несучої здатності та мінімуму маси.

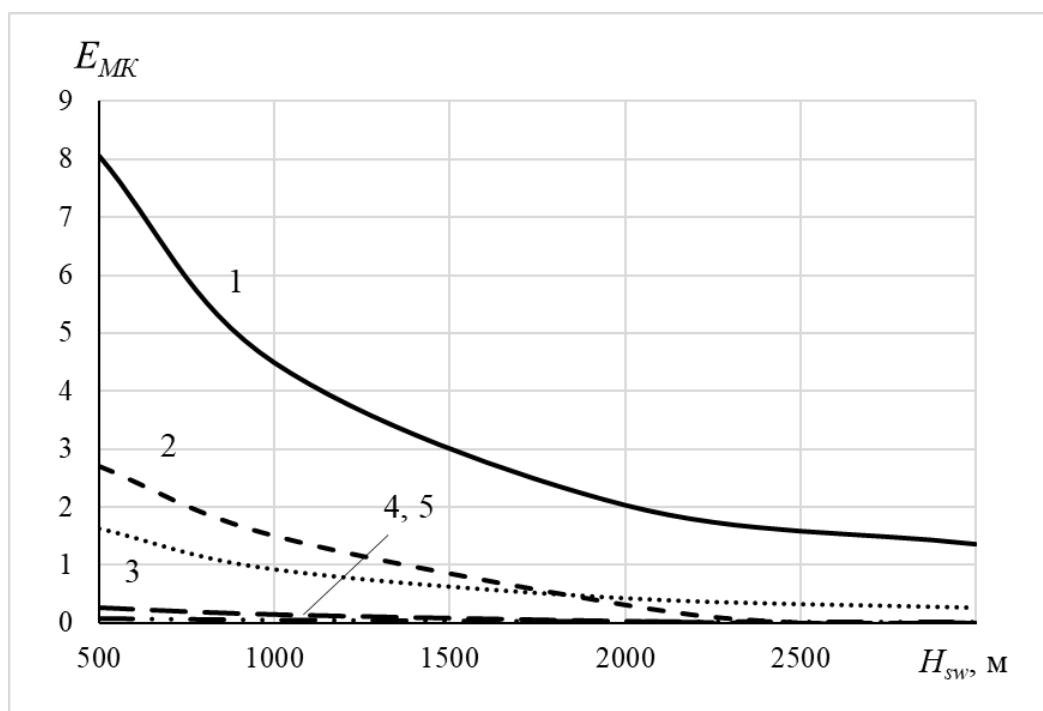


Рисунок 5.8 – Залежність відносної маси m_{MK}/m_w міцного корпусу ($k=1/3$) тороїдальної форми змінної товщини із різних конструкційних матеріалів від робочої глибини занурення:

1 – СП ВМПС/ЕДТ-10; 2 – ВП М35J/ЕДТ-10;

3 – сталь ($\sigma_{0,2}=320$ МПа); 4 – сталь ($\sigma_{0,2}=800-900$ МПа); 5 – титанові сплави

5.3 Висновки за розділом 5

1. Вперше отримано дані про вплив поєднання проектних параметрів (технологічних, фізико-механічних, геометрії корпусу) на масогабаритні характеристики тороїдальних міцних корпусів з ПКМ при обмеженні за міцністю. Виявлено резерви зниження маси тороїдального міцного корпусу за рахунок формування способом намотування з викомодульних волокон. Практичну цінність, з точки зору масогабаритних показників, представляють тороїдальні міцні корпуси з $0,1 \leq k \leq 0,33$.

2. Виконано оцінку техніко-економічної ефективності використання високоміцних матеріалів для корпусів тороїдальної форми з врахуванням вартості та жорсткості. Показано, що вартість тороїдального корпусу з ВП ($E_{ВП}=345$ ГПа) в 1,3 рази більше вартості корпусу зі СП. В той же час, зі

збільшенням роботи глибини занурення без збільшення модуля пружності скляних волокон СП стає неефективним через необхідність збільшення товщини оболонки, а при товщині стінки намотаного виробу вище 80 мм важко забезпечити стабільність міцнісних властивостей готового виробу. Епоксипластик на основі середніх за модулем високоміцних волокон ($E_{ВП}=275-345$ ГПа, міцність на розтягування – 4500...7000 МПа) найбільш раціональний для виготовлення тороїдальних міцних корпусів глибоководної техніки.

Висновки

В дисертаційній роботі сформульовано та вирішено низку задач, які забезпечили досягнення поставленої мети наукового дослідження – удосконалення методу розрахунку міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з врахуванням конструктивно-технологічних факторів його виготовлення із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волокном, а саме:

1. **Вперше**, на основі рівнянь теорії ортотропних оболонок у геометричній, фізичній, лінійній постановці отримано математичну модель згинання замкненої кругової тороїдальної оболонки при дії гідростатичного тиску на міцний корпус підводного апарату, що дозволяє врахувати змінну жорсткість оболонки у поперечному перерізі. Математична модель, на відміну від існуючих моделей, враховує змінну товщину в результаті використання методу намотування та рекомендацій класифікаційного товариства Bureau Veritas щодо оцінки пружних характеристик композиційного матеріалу за властивостями його компонентів. Встановлено, що використання традиційної теоретичної моделі оцінки за Фойхтом і Рейсом призводить до перебільшення пружних характеристик шару, в порівнянні з використанням практичних рекомендацій класифікаційного товариства Bureau Veritas: для ВП на 20%, а для СП розбіжність складає 5,6%.

2. За допомогою отриманої математичної моделі **удосконалено** метод розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, що дало змогу врахувати конструктивно-технологічні фактори виготовлення із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волокном (або стрічкою). Проведено аналіз збіжності ряду в розв'язку та прийнято достатньою кількість членів ряду $M=5$.

3. На основі удосконаленого методу розроблено розрахунково-аналітичну методику розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному

стисканні з урахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення його із полімерних композиційних матеріалів способом намотування волокном. Методика надає можливість вибору сполучників, односпрямованих наповнювачів та схем армування.

4. Отримано закономірності впливу на напружено-деформований стан намотаного тороїдального міцного корпусу схем армування, геометричних параметрів корпусу, перспективних типів армуючих наповнювачів та сполучників, змінної товщини оболонки та її осереднення. Встановлено, що неврахування конструктивно-технологічних факторів виготовлення способом намотування та особливостей розрахунку композиційних матеріалів і використання спрощених методів розрахунку призводить до зменшення напружень до 50% та виникненню помилки в небезпечну сторону.

5. Проведено оцінку техніко-економічної ефективності використання високоміцних волокнистих матеріалів для виготовлення тороїдальних міцних корпусів, при обмеженні за міцністю, з метою створення раціональних у ваговому та технологічному відношенні корпусів, в залежності від глибини експлуатації, на початковій стадії проектування апаратів. Встановлено, що для міцних корпусів підводних апаратів тороїдальної форми найбільш раціональним є епоксипластики на основі середніх за модулем та високоміцних вуглецевих волокон.

6. **Отримав подальший розвиток** метод розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні, з врахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення способом намотування із полімерних композиційних матеріалів.

Перелік джерел посилання

1. Подводные аппараты и их манипуляторы: монография / В.П Шостак. – Чикаго: Мегатрон, 2011. – 134 с.
2. Минаков, Н.М. Актальные задачи и роли подводной техники при проведении научно-исследовательских, подводно-технических и поисково-спасательных работ на море / Н.М. Минаков // Материалы 4-й Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана». – Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2011. – С. 26–30.
3. Войтов, Д.В. Подводные обитаемые аппараты / Д.В. Войтов. – М. : ООО «Издательство АСТ»: ООО «Издательство Астрель», 2002. – 303 с.
4. Диомидов, М.Н. Подводные аппараты (проектирование и конструкция) / М.Н. Диомидов, А.Н. Дмитриев. – Л. : Судостроение, 1966. – 364 с.
5. Дмитриев, А.Н. Проектирование подводных аппаратов / А.Н. Дмитриев. – Л. : Судостроение, 1978. – 235 с.
6. Боженков, Ю.А. Самоходные необитаемые подводные аппараты / под общ. ред. И.Б. Иконникова. – Л.: Судостроение, 1986. – 164 с.
7. Крептюк, А. В. Перспективы метода намотки как способа создания прочных корпусов подводных конструкций и аппаратов / А.В. Крептюк // Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. 2012. № 4. – С. 133–148.
8. Pat. 2026951 Great Britain, МКИ В63В 3/13. Underwater hulls or tanks / Santi; Giunio G. (Italy, IT). – № 7915212; filled 2.05.1979; published 13.02.1980.
9. А.с. 1048647 РФ, МПК 5 В 63 В3/13. Корпус глубоководного аппарата / Ю.А. Пятницкий, Э.В. Ганов. – № 3415435/11, заявл. 23.03.1982, опубл. 15.04.1994.
10. Pat/ 04043190A Japan, МКИ В63G 8/00. Large-sized submersible vessel / Baba Eiichi (Mitsubishi Heavy Ind LTD). – № 02150698; filled 08.06.19904 published 13.02.1992. – 1 p.
11. Патент на корисну модель № 78215, Україна, ММК (2013.01) В63G8/00. Підводне судно типу «пірнаюче блюдо» підвищеної маневреності /

Є.Т. Бурдун, А.В. Крептюк. – Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. – № У 2012 10913; заявл. 18.09.2012; опубл. 11.03.2013// Промислова власність. 2013. – Бюл. №5.

12. Energy systems of extended endurance in the 1-100 kilowatt for undersea applications: a report National Research Council (U.S.) / Committee on Undersea Warfare. Panel on Energy Sources National Academies. 1968. – 132 p.

13. Concept Design for a Manned Underwater Station / Defense Technical Information Center. 1967. – 234 p.

14. Prescott, Alan I. Ocean Engineering Research Advances / Alan I. Prescott. – Novs Publishers. 2008. – 334 p.

15. Pat. 3709307 USA, E 21B 15/02. Underwater drilling and production vessel / E. Clark Ernest, assignee Phillips Petroleum Company. – № 78118; filled 05.10.1970; published 09.01.1973. – 9 p.

16. Ross, C.T.F. Pressure vessels; external pressure technology / C.T.F. Ross. – 2d ed. UK: Woodhead Publishing. 2011. – 488 p.

17. Ross, C.T.F. Exploiting the Deep Oceans for Energy Resources and for Reducing the Effects of Climatic Change / C.T.F. Ross // J. of Ocean Technology. 2007. Vol. 2. No. 2. – P. 76–84.

18. Ross, C.T.F., Whittaker T., Little A.P.F. Design of Submarine Pressure Hulls under External Hydrostatic Pressure / C.T.F. Ross // Proceedings of the Tenth International Conference on Computational Structures Technology, Valencia, Spain. B/H/V/ Topping, J.M. Adam, F.J. Pallares, R. Bru and M.L. Romero (Eds). Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK. 2010. – 311 p.

19. Ross, C.T.F. Design of an Underwater Drilling Rig / C.T.F. Ross, R.J. Rodriguez-McCullough, A.P.F. Little, M. El-Hajj // Proceedings of the Thirteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing. B.H.V. Topping, Y. Tsompanakis (Eds). Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK. 2011. – 158 p.

20. Ross, C.T.F. A Conceptual Design of an Unterwater Missile Launcher / C.T.F. Ross // Ocean Engineering. 2005. Vol. 32. – P 85–99.

21. Ross, C.T.F. Design of Submarines / C.T.F. Ross. – University of Portsmouth, UK. 2000.
22. Pat. 4282823 USA, N63G 8/00. Underwater hull or tank / G. Santi Giunio; assignee S.S.O.S. Sub Dea Oil Services S.p.A. – Milan, Itali. – № 62064; filled 30.07.1979; published 11.08.1981. – 5 p.
23. Бурдун, Е.Т. Направления развития в проектировании прочных корпусов из композиционных материалов подводных аппаратов и конструкций / Бурдун Е.Т., Крептюк А.В // Підводна техніка і технологія: І Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю. – Миколаїв. НУК. 2012. – С. 22–31.
24. Blachut, J. Composite Toroidal Pressure Hull / J. Blachut, B.H.V. Topping, Z. Bittnar // Proceedings of the Sixth International Conference on Computational Structures Technology. Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK. 2002. – 131 p.
25. Pat. US 3413947 A, IPC B 63 C 1100. Submarine craft / Jacques Picard. Institut Francais du Petrole des Carburants et Lubrifiants (Rueil-Malmaison, France). – № 633732; filled 26.04.1966; published 03.12.1968. – 7 p.
26. Pat. US 04004429, IPC E 02 D 29/00. Deep underwater sphere / Jr. Mouton, J. William. (Metairie, LA). – № 5/466045; filled 01.05.1974; published. 25.01.1977. – 6 p.
27. Патент на корисну модель №78215, Україна, ММК (2013.01) B63G8/00. Підводне судно типу «Пірнаюче блюдо» підвищеної маневреності / Є.Т. Бурдун, А.В. Крептюк. – Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова. № U2012 10913; заяв. 18.09.2012; опубл. 11.03.2013// Промислова власність, 2013. – Бюл. №5.
28. Design of the Atlantis II Hull [Electronic resource] – Mode of access: <http://web.mit.edu/12.000/www/m2005/a2/finalwebsite/equipment/hab-shell.shtml>
29. Прокофьев, С. Подводные средства сил специальных операций зарубежных стран / С. Прокофьев // Зарубежное военное обозрение. – №10, 1998. – С. 38–46.

30. Zimmerman, S. Submarine Technology for the 21st Century / S. Zimmerman. – Trafford Publishing, 2000. – 230 p.
31. Cardon, A.H. Durability Analysis of Structural Composite Systems: Reliability, Risk Analysis and Prediction of Safe Residual Integrity / A.H. Cardon. – Taylor & Francis, 1996. – 190 p.
32. On Lightweight Design of Submarine Pressure Hulls: Report no EM 2012.021/ A. Van Keulen, S.I. Wong. – Department of Precision and Microsystems Engineering. – 2012. – 181 p.
33. Handbook of Composites / edited by S.T. Peters. – 2d ed. – London: Chapman & Hall, 1998. – 1120 p.
34. Burcher, Roy. Concepts in Submarine Design / Roy Burcher. – Cambridge University Press CUP, 1995. – 316 p.
35. Graham, D. Composite pressure hulls for deep ocean submersibles / D. Graham. – Composite Structures. – 1995. – Vol. 32. – P. 335–343.
36. Крептюк, А.В. Проектирование и метод расчета устойчивости композитных тороидальных прочных корпусов подводных технических средств, полученных продольно-поперечной намоткой / А.В. Крептюк // Проблемы техники: Научно-производственный журнал. – 2011. – №2. – С. 113–127.
37. Черных, К.Ф. Расчет торообразных оболочек / К.Ф. Черных, В.А. Шамина // Сб. «Исследования по упругости и пластичности», № 2, изд. ЛГУ, 1963. С – 63–69.
38. Гуляев, В.И. Устойчивость тороидальных оболочек при действии внешнего неравномерного давления / В.И. Гуляев, В.В. Гайдайчук, Г.А. Савченко // Прикл. мех. (Киев). -1987. – 23, №7. – С. 13–17.
39. Колдунов, В.А. Численная модель расчета напряженно-деформированного состояния ортотропных торообразных оболочек / В.А. Колдунов // Физ. мех. Твер. гос. ун-т. – Тверь, 1994. – С.77–81.
40. Чаплин, Н.А. Определение напряженно-деформированного состояния ортотропной торовой оболочки переменной толщины / Н.А. Чаплин // Расчет. и

эксперим. исслед. прочности, устойчивости и колебаний конструкций летат. аппаратов, М. :, 1987. – С. 62–67.

41. Григоренко, Я.М. Численное решение задач статики ортотропных оболочек с переменными параметрами / Я.М. Григоренко, А.Т. Василенко. – Киев, 1975.

42. Ганеева, М.С. Численное исследование устойчивости ортотропных тороидальных оболочек переменной толщины / М.С. Ганеева, Л.А. Косолапова // Исследования по теории оболочек: Труды семинара. – Вып. XXI, ч. I. – Казань, 1988. – С. 23–36.

43. Ганеева, М.С. Нелинейный изгиб и устойчивость тонких упругих ортотропных тороидальных оболочек под действием равномерного внешнего давления / М.С. Ганеева, Л.А. Косолапова // Прочн. и устойчивость оболочек. Тр. семин. Казан. физ.-техн. ин-та. Вып. 19. Ч. 1. – Казань, 1986 г. – С. 23–26.

44. Ганеева, М.С. Прочность и устойчивость оболочек вращения / М.С. Ганеева. – М., Наука, 1992. – 161 с.

45. Ганеева М.С. Численное исследование напряженно-деформированного состояния и устойчивости ортотропных тороидальных оболочек / М.С. Ганеева, Л.А. Косолапова // Казань. – Деп. в ВИНТИ 29.01.85, № 864-85 ДЕП. 1985. – 26 с

46. Прочность материалов элементов конструкций в экстремальных условиях. Т. 2 / Под ред. акад. АН УССР Г.С. Писаренко.- Киев: Наукова думка, 1986. – 772 с.

47. Гребенюк, С.Н. Напряженно-деформированное состояние тороидальных оболочек. / С.Н. Гребенюк, Ю.А. Сысоев, Н.Ю. Сысоев // Вестник Запорожского национального университета. – 2010. – №2 – С 24–28.

48. Максютлов, М.С. Концепция моделирования и постановка краевой осесимметричной задачи определения напряженно-деформированного состояния тороидальных оболочек / М.С. Максютлов, В.А. Кадымов, В.Б. Терновсков // ADVANCED SCIENCE сборник статей III Международной

научно-практической конференции: в 2 ч. Изд. : "Наука и Просвещение" – Пенза, 23 апреля 2018 г. – С. 13–17.

49. Присташ, С.Ф. Аналіз стану та проблем розрахунку напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу для підводних апаратів / С.Ф. Присташ // Вісник Одеського національного морського університету. – Одеса, 2020. № 1 (61). – С. 55–69.

50. Комков, М.А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения: учеб. Пособие / М.А. Комков, В.А. Тарасов // М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 431 с.

51. Peters, S.T. Composite Filament Winding / S.T. Peters – ASM International. 2011. – 167 p.

52. Росато, Д.В. Намотка стеклонитью: Развитие метода, производство, области применения и конструирование / Д.В. Росато, К.С. Грове. – М. : Машиностроение, 1969. – 310 с.

53. Quinn, J.A. Composites-Design Manual (Ed. 4) / J.A. Quinn. – James Quinn Associates Ltd. 2007. – 176 p.

54. Комков, М.А. Определение конструктивно-технологических параметров оболочек, намотанных из композиционных материалов: Учебное пособие / М.А. Комков, И.М. Буланов – М. : МГТУ, 1992. – 84 с.

55. Комков, М.А. Анализ конструктивно-массового совершенства оболочек сосудов давления / М.А. Комков, В.А. Тарасов, О.В. Зарубина // Известия вузов «машиностроение». 2012. – №3. – С. 11–18.

56. Zu, L. Design and optimization of filament wound composite pressure vessels: proefschrift / L Zu. – Xi'an University of Technology, Xi'an. – China. 2012. – 292 p.

57. Li S. An Analysis of Filament Overwound Toroidal Pressure Vessels and Optimum Design of Such Structures / S. Li, J. Cook // J. Pressure Vessel Technol. May 2002. – Vol. 124, issue 2. – P. 215–222.

58. Zu, L. Stability of fiber trajectories for winding toroidal pressure vessels / L Zu // Composite Structures. April, 2012. – Vol. 94, issue 5. – P. 1855–1860.

59. Zu, Lei. Integral design and simulation of composite toroidal hydrogen storage tanks / Lei Zu, Zhang Dinghau, Xu Yingqiang, Xiao Dongjuan // International Journal of Hydrogen Energy. January, 2012. – Vol. 37, issue 1. – P. 1027–1036.

60. Светличная, В.Б. Расчет и рациональное проектирование криволинейных труб из армированных пластиков при статическом нагружении: дис. канд. техн. наук: 01.02.04 / В.Б. Светличная. – Волгоград. 2005. – 163 с.

61. Лоскутов, Ю.В. Разработка методики расчета многослойных композитных трубопроводов летательных аппаратов: дис. канд. техн. наук: 05.07.03 / Ю.В. Лоскутов. – Йошкар-Ола. 2001. – 146 с.

62. Чан, Нгок Тхань. Разработка конструкторско-технологических решений по безоправочной намотке торовых сосудов давления из композитных материалов: дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / Нгок Тхань Чан. – Москва. 2007. – 166 с.

63. Калинчев, В.А. Намотанные стеклопластики / В.А. Калинчев, М.С. Макаров. – М.: Химия. 1986. – 272 с.

64. Композиционные материалы: Справочник / Под ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение. 1990. – 512 с.

65. Гайструк, В.Е. Уровни дефектов структуры в изделиях из полимерных композиционных материалов, возникающих в процессе их производства / В.Е. Гайструк, В.А. Коваленко // Авиационно-космическая техника и технология. 2012. – №6 (93). – С. 5–12.

66. Воробей, В.В. Основы технологии и проектирования корпусов реактивных двигателей / В.В. Воробей, В.Б. Маркин. – Новосибирск: Наука. 2003. – 164 с.

67. Ивановский, В.С. Технология производства композитного баллона с полимерным лейнером / В.С. Ивановский, О.В. Ивановская // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. 2013. – Вып. 2. – С. 40–45.

68. Graphite-Fiber-Reinforced Plastic Pressure Hull Mod 2 for the Advanced Unmanned Search System (AUSS): NOCS technical Report 1245 / San Diego, CA. Aug. 1988. – 232 p.

69. Алфутов, Н.А. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов / Н.А. Алфутов, П.А. Зиновьев, Б.Г. Попов. – М. : Машиностроение. 1984. – 304 с.

70. Ванин, Г.А. Микромеханика композиционных материалов / Г.А. Ванин. – К.: Наук. думка. 1971. – 304 с.

71. Тарнопольский, Ю.М. Особенности расчета деталей из армированных пластиков / Ю.М. Тарнопольский, А.В. Розе. – Рига: Зинатне. 1969. – 274 с.

72. Болотин, В.В. Механика многослойных конструкций / В.В. Болотин, Ю.Н. Новичков. – М. : Машиностроение. 1980. – 375 с.

73. Образцов, И.Ф. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов / И.Ф. Образцов, В.В. Васильев, В.А. Бунаков. – М.: Машиностроение. 1977. – 144 с.

74. Bureau Veritas.: Hull in Composite Materials and Plywood, Material Approval, Design Principles, Construction and Survey. March 2012 / Rule Note NR 546 DT R00 E [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.veristar.com/portal/veristarinfo/detail?content-id=/repository/collaboration/sites%20content/live/veristarinfo/vi-content-navigation/generalinfo/giRulesRegulations/bvRules/yachtsrules>

75. Bureau Veritas. Rules for the Classification and the Certification of Yachts / - NR 500 DT R01 E March 2012

76. Carbon Fiber / [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.torayca.com/en/index.html>

77. Properties of Filament / [Electronic resource] – Mode of access: http://www.tohotenax.com/tenax/en/products/st_property.php

78. Nippon Graphite Fiber Corporation: Granoc Yarn / [Electronic resource] – Mode of access: <http://www31.ocn.ne.jp/~ngf/english/product/pl.html>

79. Carbon Fiber / [Electronic resource] – Mode of access: http://www.cemselectorguide.com/carbon_fiber.php

80. Pitch-based Carbon Fiber / [Electronic resource] – Mode of access: http://www.mpi.co.jp/english/products/industrial_materials/pitch_carbon_fiber/pbcf001.html#anc01

81. HexTow® Carbon Fiber – Selector Guide / [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.hexcel.com/Resources/SelectorGuides/>

82. Baker A. Composite materials for aircraft structures / A. Baker, S. Dutton, D. Kelly. – Second Edition (AIAA Education). 2004. – 602 p.

83. Carbon Fiber used in Fiber Reinforced Plastic (FRP) / [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.build-on-prince.com/carbon-fiber.html>

84. Материалы на основе высокомодульных высокопрочных стеклянных волокон (НПО «Стеклопластик») / Режим доступа: <http://npo-stekloplastic.ru/production/fiber-materials/hm-hs-fiber-materials/>

85. Крептюк, А.В. Проектирование и метод расчета устойчивости композитных тороидальных прочных корпусов подводных технических средств, полученных продольно-поперечной намоткой / А.В. Крептюк // Проблемы техники: Науково-виробничий журнал. 2011. – №2. – С. 113–127.

86. Бурдун, Е.Т. Упругие характеристики намоточной тороидальной оболочки / Е.Т. Бурдун, А.В. Крептюк // Методи розв'язання прикладних задач механіки деформівного твердого тіла: збірник наукових праць Дніпропетр. нац. ун-ту. 2010. – Вип. 11. – С. 40–48.

87. Бурдун, Е.Т. Влияние технологических схем намотки тороидальных оболочек на упругие и весовые характеристики / Бурдун Е.Т., Крептюк А.В. // Композиционные материалы в промышленности: материалы 30-й международной научно-практической конференции, Ялта. 2010. – С. 427–429.

88. FreeCAD. FreeCAD: An open-source parametric 3D CAD modeler / [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.freecadweb.org/>.

89. Maxima / [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.maxima.sf.net>

90. Apache OpenOffice: The Free and Open Productivity Suite / [Electronic resource] – Mode of access:: <https://www.openoffice.org/>.

91. Бурдун, Е.Т. Порівняння методів оцінки ефективних пружних характеристик тороїдального міцного корпусу підводного засобу виконаного намотуванням волокном / Е.Т. Бурдун, С.Ф. Присташ, С.П. Гейко, Копійка С.В.. // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2019 р. – С. 239–243.

92. Белая С.Ф. Влияние схемы намотки на прочность тороидального прочного корпуса подводного аппарата при гидростатическом сжатии/ С.Ф. Белая, Э.Т. Бурдун// Підводна техніка і технологія: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. Миколаїв: НУК, 2015 р. – С. 3–6.

93. Белая С.Ф. Эффективность использования полимерных композиционных материалов для тороидальных прочных корпусов подводных аппаратов/ С.Ф. Белая, О.В. Петрюк// Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференція. Миколаїв: НУК, 2015. – С. 57–59.

94. Белая С.Ф. Эффективность использования полимерных композиционных материалов для тороидальных прочных корпусов подводных аппаратов выполненных намоткой/ С.Ф. Белая// Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування: матеріали 6-тої Міжнародної науково-практичної конференція. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2015 р. – С. 168–170.

95. Власов В.З. Избранные труды. Т.1/ В.З. Власов. – М.: Издательство академии наук СССР, 1962. – 528 с.

96. Новожилов В.В. Линейная теория оболочек/ В.В. Новожилов, К.Ф. Черних, Е.И. Михайловский. – Л.: Политехника, 1991. – 656 с.

97. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела / С.Г. Лехницкий. – М.: Наука, 1977. – 416 с.

98. Амбарцумян С.А. Общая теория анизотропных оболочек / С.А. Амбарцумян. – М.: Наука, 1974. – 416 с.
99. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов/ В.В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
100. Черних К.Ф. Расчет торообразных оболочек/ К.Ф. Черних. – Сб. «Исследования по упругости и пластичности», сб. 2. – Изд. ЛГУ, 1963.
101. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем/ А.С. Вольмир. – М.: Физматгиз, 1967. – 984 с.
102. Карпов Я.С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов: учебник/ Я.С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т». 2010. – 768 с.
103. Соломенко Н.С. Строительная механика подводных лодок/ Н.С. Соломенко, Ю.Н. Румянцев. – Издательство Высшего Морского Инженерного ордена Ленина училища им. Ф.Э. Дзержинского, Ленинград, 1962. – 396 с.
104. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров/ Г. Корн, В. Корн. – М.: Наука, 1968. – 720 с.
105. Рвачев В.Л. Геометрические приложения алгебры логики/ В.Л. Рвачев. – Изд-во «Техника», Киев, 1967.
106. Присташ С.Ф. Метод розрахунку міцного корпусу підводного апарату в формі тору, виконаного намотуванням/ С.Ф. Присташ, Є.Т. Бурдун// Вісник Одеського національного морського університету. Одеса, 2017. № 4 (53). – С. 152–163.
107. Sizonenko O. Peculiarities of stress-strain state of toroidal pressure hull, made by winding. International journal for science, technics and innovations for the industry/ O. Sizonenko, E. Burdun, S. Prystash// Machines, Technologies, Materials, PRINT ISSN 1313 – 0226, ISSN WEB 1314-507X, Year XII Issue, 6/2018. – P. 240–243.
108. Sizonenko O. Peculiarities of stress-strain state of toroidal pressure hull, made by spiral winding. International journal for science, technics and innovations for the industry/ O. Sizonenko, E. Burdun, S. Prystash// Machines, Technologies,

Materials, PRINT ISSN 1313 – 0226, ISSN WEB 1314-507X, Year XII, Issue 11/2018. – P. 466–469.

109. Бела С.Ф. Рівняння згину тонкостінної ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини із полімерних композиційних матеріалів/ С.Ф. Бела, Є.Т. Бурдун// Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: матеріали всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю. Миколаїв: НУК, 2013. – С. 220–223.

110. Бела С.Ф. Рівняння згину замкненої ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини виконаної намотуванням/ С.Ф. Бела// Макаровські читання: матеріали конференції всеукраїнського форуму молодих науковців, присвячений Дню науки. Миколаїв: НУК, 2013. – С. 17–18.

111. Бела С.Ф. Рівняння згину замкненої ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини виконаної намотуванням/ С.Ф. Бела, Є.Т. Бурдун// Композиционные материалы в промышленности: матеріали 33 Міжнародної конференції (СЛАВПОЛИКОМ). Ялта, 2013р. – С. 226–227.

112. Бела С.Ф. Рівняння згину міцного корпусу підводного апарату в формі тора виконаного спіральним намотуванням/ С.Ф. Бела// Підводна техніка і технологія: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. Миколаїв: НУК, 2014 р. – С. 5–7.

113. Комков М.А. Композитный торовый баллон для дыхательных аппаратов с продольно-поперечной схемой армирования силовой оболочки/ М.А. Комков, Ч.Н. Тхань// Известия вузов. Машиностроение. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. № 3. – С. 10–19.

114. Белая С.Ф. Напряженное состояние прочного корпуса подводного аппарата в форме тора из композиционных материалов/ С.Ф. Белая, О.В. Петрюк// Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2015 р. – С. 98.

115. Белая С.Ф. Напряженно-деформированное состояние тороидального прочного корпуса подводного аппарата при различных схемах

намотки/ С.Ф. Беляя, Е.Т. Бурдун // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2016 р. – С. 84–87.

116. Бурдун Є.Т., Присташ С.Ф. Напружено-деформований стан міцного корпусу підводного апарату в формі тору/ С.Ф. Присташ, Є.Т. Бурдун// Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: матеріали всеукраїнської конференції з міжнародною участю. Миколаїв: НУК, 2017 р. – С 116–118.

117. Присташ С. Ф. Напружено-деформований стан міцного корпусу підводного апарату у формі тору, виготовленого із ПКМ/ С.Ф. Присташ, Є.Т. Бурдун// Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2017 р. – С. 117–118.

118. Бурдун Є.Т. Аналіз напружено-деформованого стану міцного корпусу підводно-технічних засобів в формі тору виконаних із ПКМ при різних схемах намотування/ Є.Т. Бурдун, С.Ф. Присташ// Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. Миколаїв: НУК, 2018 р. – С 81–82.

119. Присташ С. Ф. Про розрахунок міцного корпусу підводно-технічних засобів в формі тору виготовленого із ПКМ методом намотування/ С.Ф. Присташ// Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті: матеріали X міжнародної науково-практичної конференції. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2018 р. – С. 238–239.

120. Бурдун Є.Т. Аналіз напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу підводно-технічного засобу, виготовленого спіральним намотуванням/ С.Ф. Присташ, Є.Т. Бурдун// Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування: матеріали V міжнародної науково-технічної конференції (Миколаїв, 17 – 19 жовтня 2018 р.). Миколаїв: НУК, 2018 р. – С 20–21.

121. Присташ С.Ф. Особливості напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу виконаного намотуванням із ПКМ/ С.Ф. Присташ// Сучасні технології обробки матеріалів: матеріали всеукраїнської наукової конференції (Миколаїв, 01 –02 листопаду 2018 р.). Миколаїв: ІПіТ НАН України, 2018 р. – С 25.

122. Burdun Y.T. Rational designing of composite toroidal pressure hull for ocean engineering/ Y.T. Burdun, A.V. Kreptiuk// Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – Астрахань: АГТУ, 2014. – № 2 (май). – С. 27 – 36.

123. Углеродистая качественная конструкционная сталь 25/ Режим доступу: <http://fx-commodities.ru/articles/uglerodistaya-kachestvennaya-konstrukcionnaya-stal-25/>

124. Титан VT22/ Режим доступу: http://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallovtit/VT22.

125. Алюминий В95/ Режим доступу: <https://nfmetall.ru/articles/32.html>.

126. Бурдун Е.Т. Оценка эффективности использования композиционных материалов для тороидальных прочных корпусов/ Е.Т. Бурдун, С.Ф. Белая/ Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: матеріали всеукраїнської конференції з міжнародною участю. Миколаїв: НУК, 2016 р. С 110 – 112.

127. Бурдун Є.Т. Аналіз впливу змінної товщини тороїдального корпусу підводного засобу на його напружено-деформований стан/ Є.Т. Бурдун, С.Ф. Присташ// Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. Миколаїв: НУК, 2020 р. – С 111-114.

128. Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Наука, 1968. – 720 с.

129. Греков В.М. оценка технико-экономической эффективности применения высокпрочных материалов для корпусов подводной техники / В.М. Греков, Б.В. Дружиловский, В.М. Рябов // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – Санкт-Петербург: ЦНИИ им. акад. Крылова, 2010. - №56 (340). – С. 187-194.

130. Бурдун Є.Т. Удосконалення методу розрахунку міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми, виготовленого намотуванням/ Є.Т. Бурдун, С.Ф. Присташ// *Вісник Одеського національного морського університету*. Одеса, 2020. № 2 (62). С. 99–105. (Журнал входить до переліку наукових фахових видань України, затвердженому МОН України, та у міжнародну наукометричну базу РИНЦ)

ДОДАТОК А

**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО
СТАНУ І ОЦІНКИ МІЦНОСТІ КОРПУСУ ПІДВОДНОГО АПАРАТУ
ТОРОЇДАЛЬНОЇ ФОРМИ ПРИ ГІДРОСТАТИЧНОМУ СТИСКАННІ З
УРАХУВАННЯМ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ
ВИГОТОВЛЕННЯ ЙОГО ІЗ ПКМ СПОСОБОМ НАМОТУВАННЯ
ВОЛОКНОМ**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
ім. адм. Макарова



ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
докт. техн. наук, проф.
Білінцов В.С.
2020 р.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО
СТАНУ І ОЦІНКИ МІЦНОСТІ КОРПУСУ ПІДВОДНОГО АПАРАТУ
ТОРОЇДАЛЬНОЇ ФОРМИ ПРИ ГІДРОСТАТИЧНОМУ СТИСКАННІ З
УРАХУВАННЯМ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ
ВИГОТОВЛЕННЯ ЙОГО ІЗ ПКМ СПОСОБОМ НАМОТУВАННЯ
ВОЛОКНОМ

№ УКФА.362111.002.М

в.о. начальника НДЧ

Савенков О.І.

Науковий керівник теми №2165

док. техн. наук, професор

Коростильов Л.І.

Начальник БС і М



Мацкевич В.В.

2020

1. ОБ'ЄКТ РОЗРАХУНКУ

Об'єктом розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) під дією зовнішнього рівномірного тиску є тороїдальний міцний корпус підводного апарату. Методика призначена для розрахунку тороїдальних міцних корпусів, виконаних способом поперечного намотування в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) із полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), для підводно-технічних систем і комплексів, підводних апаратів.

2. МЕТА РОЗРАХУНКУ

Метою розрахунку є оцінка міцності по визначених компонентах НДС тороїдального корпусу при гідростатичному стисканні в небезпечних точках, виконаного способом поперечного намотування в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) із ПКМ.

3. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

3.1 Тороїдальний корпус представляє собою замкнену пустотілу тонкостінну ($h \leq 0,2a$) тороїдальну оболонку круглого поперечного перерізу, отриману шляхом безперервного намотування волокном або армуючою стрічкою, що знаходиться під дією гідростатичного стискання. Вичерпання несучої здатності оболонки міцного корпусу при гідростатичному стисканні може призвести до руйнування матеріалу, коли компоненти напружено-деформованого стану оболонки досягають критичного рівня, що нормується допустимим значенням коефіцієнта безпеки.

3.2 При поперечному намотуванні в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) одна система волокон вкладається в напрямку паралелі, а інша система волокон – в напрямку меридіана, утворюючи поперечний шар. При такому способі виготовлення формується стінка змінної товщини із шаруватого ортотропного матеріалу.

3.3 Розроблена методика може бути використана на початкових етапах проектування міцних корпусів тороїдальної форми способом поперечного намотування в комбінації з повздовжнім намотуванням (або викладкою) із ПКМ для підводних технічних засобів.

4. ВИХІДНІ ДАНІ

Вихідні дані для розрахунку НДС міцного корпусу тороїдальної форми можуть бути отримані від виробника компонентів або розраховані приведеними в п. 5 співвідношенням.

4.1 Вихідні дані для розрахунку розподілені за наступними групами.

Конструктивні параметри намотаного тороїдального корпусу:

- внутрішній радіус меридіанного перерізу a , м;
- відстань від осі обертання до центру меридіанного перерізу R , м;
- параметр, що характеризує геометрію тора $k=a/R$;
- товщина повздовжнього шару (армуючого волокна або стрічки) h_2 , м;

- кількість шарів в пакеті, які вкладені в напрямку меридіана l_1 ;
- кількість шарів в пакеті, які вкладені в напрямку паралелі l_2 ;
- робоча глибина занурення H_{sw} , м;
- коефіцієнт запасу міцності f_s .

Пружні характеристики сполучника:

- модуль пружності сполучника E_M , МПа;
- коефіцієнт Пуассона сполучника μ_M .

Пружні характеристики армуючого матеріалу:

- модуль пружності армуючого матеріалу E_B , МПа;
- поперечний модуль пружності армуючого матеріалу E_{B90} , МПа;
- коефіцієнт Пуассона армуючого матеріалу μ_B .

4.2 РОЗРАХУНКОВЕ ВИЗНАЧЕННЯ ВИХІДНИХ ДАНИХ

Пружні постійні моношару в вісях армування (рис. 1):

$$\begin{aligned}
 E_{1M} &= (E_B \eta + (1-\eta)E_M) C_{UD1}, \\
 E_{2M} &= C_{UD2} \times \left(\left(\frac{E_M}{1-\mu_M^2} \right) \times \frac{1+0,85 \times \eta^2}{(1-\eta)^{1,25} + \frac{E_M \times \eta}{E_{B90} \times (1-\mu_M^2)}} \right), \\
 \mu_{12M} &= C_{UDv} \times (\mu_B \times \eta + \mu_M \times (1-\eta)), \\
 \mu_{21M} &= \mu_{12M} \times \frac{E_{2M}}{E_{1M}}, \\
 B_{11} &= \frac{E_{1M}}{1-\mu_{12M}\mu_{21M}}, \quad B_{22} = \frac{E_{2M}}{1-\mu_{12M}\mu_{21M}}, \quad B_{12} = \frac{E_{2M}\mu_{12M}}{1-\mu_{12M}\mu_{21M}} = \frac{E_{1M}\mu_{21M}}{1-\mu_{12M}\mu_{21M}},
 \end{aligned} \tag{1}$$

де, C_{UD1} , C_{UD2} , C_{UDv} – коефіцієнти, що враховують особливості поверхонь армуючих волокон і їх взаємодію з матрицею [1];

$E_{1м}$ – модуль пружності односпрямованого армуючого моношару в напрямку армування, МПа;

$E_{2м}$ – модуль пружності односпрямованого армуючого моношару поперек армування, МПа;

$\mu_{12м}$ – коефіцієнт Пуассона;

η – відносний об'ємний вміст волокон.

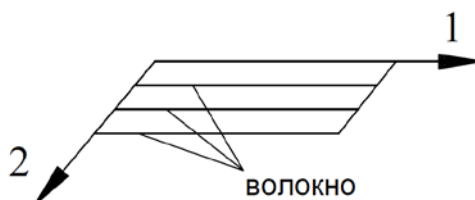


Рисунок 1 – Система координат моношару в вісях армування

5. РОЗРАХУНОК НДС МІЦНОГО КОРПУСУ В ФОРМІ ТОРУ ПРИ ГІДРОСТАТИЧНОМУ СТИСКАННІ, ВИКОНАНОГО СПОСОБОМ ПОПЕРЕЧНОГО НАМОТУВАННЯ В КОМБІНАЦІЇ З ПОВЗДОВЖНІМ НАМОТУВАННЯМ (АБО ВИКЛАДКОЮ) ІЗ ПКМ

5.1 Зовнішній тиск, який діє на міцний корпус при навантаженні, визначається за формулою (рис. 2):

$$p = H_{sw}/100 \text{ [МПа]},$$

де H_{sw} – робоча глибина занурення, м.

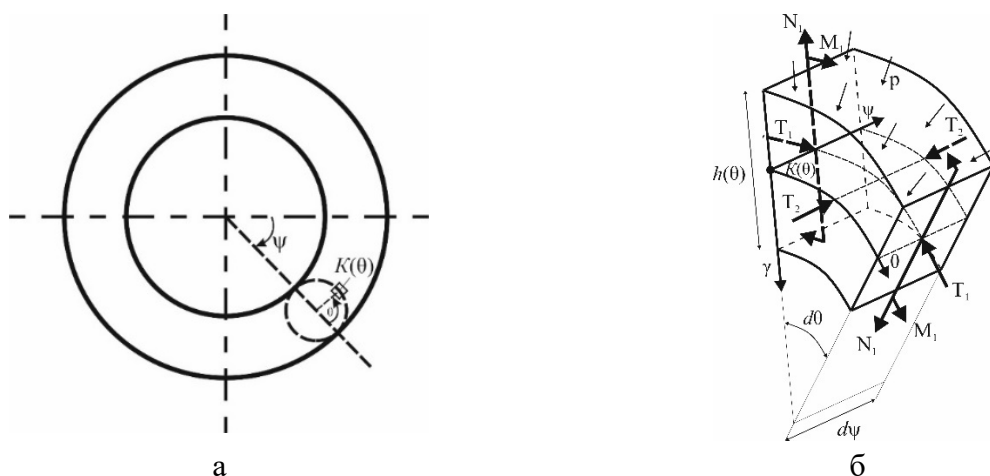


Рисунок 2 – Геометричні параметри діаметрального перерізу тороїдальної оболонки змінної товщини (а) та зусилля і моменти в точці типу $K(\theta)$, серединної поверхні оболонки (б)

5.2 Розрахунок компонентів НДС (рис. 2).

Рівняння рівноваги в т. $K(\theta)$:

$$\begin{cases} \frac{\partial B T_1}{\partial \theta} - \frac{\partial B}{\partial \theta} T_2 + A B k_1 N_1 = 0 \\ -(k_1 T_1 + k_2 T_2) + \frac{1}{A B} \frac{\partial B N_1}{\partial \theta} = p \end{cases}, \quad (2)$$

де $A = a$, $B = \frac{a}{k}(1 + k \cos \theta)$ – коефіцієнти Ламе для тороїдальної поверхні;

k_1, k_2 – головні кривизни;

T_1, T_2 – погонні нормальні зусилля;

N_1 – перерізуюча сила;

M_1 – згинальний момент.

В формулі (2) та наступних індекси 1 і 2 відповідають двом криволінійним координатам θ і ψ , відповідно.

Геометричні співвідношення мають вигляд в т. $K(\theta)$:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{A} \frac{\partial u(\theta)}{\partial \theta} + k_1 w(\theta), & \varepsilon_2 &= \frac{1}{A B} \frac{\partial B}{\partial \theta} u(\theta) + k_2 w(\theta), \\ \chi_1 &= -\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{A} \frac{\partial w(\theta)}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial k_1}{\partial \theta} \frac{u(\theta)}{A}, & \chi_2 &= -\frac{1}{A^2 B} \frac{\partial B}{\partial \theta} \frac{\partial w(\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial k_2}{\partial \theta} \frac{u(\theta)}{A}, \end{aligned} \quad (3)$$

де $w(\theta)$ – радіальне переміщення меридіанного перерізу тора;

$u(\theta)$ – тангенціальне переміщення т. $K(\theta)$ вздовж кутової координати θ .

Вирази для погонних зусиль, перерізуючих сил та моментів в т. $K(\theta)$:

$$\begin{aligned} N_1(\theta) &= \frac{1}{A B} \frac{\partial B M_1(\theta)}{\partial \theta}, & N_2(\theta) &= 0, \\ T_1(\theta) &= C_{11}(\theta) \varepsilon_1(\theta) + C_{12}(\theta) \varepsilon_2(\theta), & T_2(\theta) &= C_{22}(\theta) \varepsilon_2 + C_{12}(\theta) \varepsilon_1, \\ M_1(\theta) &= D_{11}(\theta) \chi_1 + D_{12}(\theta) \chi_2, & M_2(\theta) &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

де $C_{ij}(\theta), D_{ij}(\theta)$ – жорсткості композитної оболонки ($i, j=1, 2$):

$$\begin{cases} D_{11}(\theta) = R_1 h_1^2(\theta) + R_2 h_1(\theta) + R_3 h_1^3(\theta) + R_4 \\ D_{22}(\theta) = R_2 h_1^2(\theta) + R_6 h_1(\theta) + R_7 h_1^3(\theta) + R_8 \\ D_{12}(\theta) = R_9 h_1^3(\theta) + R_{10} h_1^2(\theta) + R_{11} h_1(\theta) + R_{12}, \\ C_{11}(\theta) = R_{13} + R_{14} h_1(\theta) \\ C_{22}(\theta) = R_{15} + R_{16} h_1(\theta) \\ C_{12}(\theta) = R_{17} + R_{18} h_1(\theta) \end{cases} \quad (5)$$

де $h_1 = h_2 \frac{1+k}{1+k \cos \theta}$ – товщина поперечного шару;

R_f ($f=1, 2 \dots 18$) функція, яка залежить від параметрів, що характеризують структуру намотаної тороїдальної оболонки, та властивостей шару (волокна або армуючої стрічки):

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{1}{12} h_2 l_2 [B_{11}(l_2^2 + 3l_1^2) + 2l_2 B_{22}(l_2 + 3l_1) + 2(B_{11} - B_{22})(3l_1 + 1)], \\
 R_2 &= \frac{1}{12} h_2^2 l_2 [2B_{11}l_2^2 + B_{22}l_2^2 + 3l_1 l_2 B_{22} + 2(B_{22} - B_{11})], \\
 R_3 &= \frac{1}{12} B_{22}(l_2 + l_1)^3, \quad R_4 = \frac{1}{12} B_{11} h_2^3 l_2^3, \\
 R_5 &= \frac{1}{12} h_2 l_2 [l_2^2(2B_{11} + B_{22}) + 3l_1(2l_2 B_{11} + l_1 B_{22}) + 2(B_{22} - B_{11})(3l_1 + 1)], \\
 R_6 &= \frac{1}{12} h_2^2 l_2 [l_2^2(B_{11} + 2B_{22}) + 3l_1 l_2 B_{11} + 2(B_{11} - B_{22})], \\
 R_7 &= \frac{1}{12} B_{11}(l_2 + l_1)^3, \quad R_8 = \frac{1}{12} B_{22} h_2^3 l_2^3, \\
 R_9 &= \frac{1}{12} B_{12}(l_2 + l_1)^3, \quad R_{10} = \frac{3}{12} B_{12}(l_2 + l_1)^2 l_2 h_2, \\
 R_{11} &= \frac{3}{12} B_{12}(l_2 + l_1)^2 l_2^2 h_2^2, \quad R_{12} = \frac{1}{12} B_{12} h_2^3 l_2^3, \\
 R_{13} &= B_{11} h_2 l_2, \quad R_{14} = B_{22}(l_1 + l_2), \\
 R_{15} &= B_{22} h_2 l_2, \quad R_{16} = B_{11}(l_1 + l_2), \\
 R_{17} &= B_{12} h_2 l_2, \quad R_{18} = B_{12}(l_1 + l_2).
 \end{aligned} \tag{6}$$

Підставляючи значення компонентів деформації з (3) в (4), а потім в (2) враховуючи, що жорсткості $C_{ij}(\theta)$, $D_{ij}(\theta)$ функції від θ для розрахунку оболонки змінної товщини), отримаємо рівняння рівноваги в переміщеннях для замкненої ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини:

$$\begin{aligned}
 L_{11}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D'_{ij})u + L_{12}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D')w &= 0, \\
 L_{21}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D'_{ij})u + L_{22}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D')w &= p,
 \end{aligned} \tag{7}$$

де лінійні диференціальні оператори L_{ij} мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
 L_{11}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D'_{ij}) &= -C_{12} \cos \theta - D_{12} \frac{k + \cos \theta}{a^2(1 + k \cos \theta)^2} - C_{22} \frac{k \sin^2 \theta}{1 + k \cos \theta} - C'_{12} \sin \theta - \\
 &- D'_{12} \frac{\sin \theta}{a^2(1 + k \cos \theta)} - C_{11} \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} - D_{12} \frac{\sin \theta}{a^2(1 + k \cos \theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} + C'_{11} \left(\frac{1}{k} + \cos \theta\right) \frac{\partial}{\partial \theta} + \\
 &+ C_{11} \left(\frac{1}{k} + \cos \theta\right) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$L_{12}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D'_{ij}) = -C_{11} \sin \theta + C_{22} \frac{k \cos \theta \sin \theta}{1+k \cos \theta} + C'_{11} \left(\frac{1}{k} + \cos \theta\right) + C'_{12} \cos \theta + C_{11} \left(\frac{1}{k} + \cos \theta\right) \frac{\partial}{\partial \theta} +$$

$$+ C_{12} \cos \theta \frac{\partial}{\partial \theta} + D'_{12} \frac{1}{a^2} (\cos \theta + \sin \theta) \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{\sin \theta}{a^2} (D_{11} + D_{12}) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} - D'_{11} \frac{1}{a^2} \left(\frac{1}{k} + \cos \theta\right) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} -$$

$$- D_{11} \frac{1}{a^2} \left(\frac{1}{k} + \cos \theta\right) \frac{\partial^3}{\partial \theta^3}$$

$$L_{21}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D'_{ij}D''_{ij}) = C_{12} \frac{a^2 k \sin \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)^3} \left(\frac{1}{1+k \cos \theta} + 3k \cos \theta + \frac{k \cos^3 \theta}{1+k \cos \theta}\right) +$$

$$+ D_{12} \frac{k \sin \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)^3} \left(\frac{1}{1+k \cos \theta} - 2k\right) + C_{22} \frac{a^2 k^2 \sin 2\theta}{a^4 (1+k \cos \theta)^3} \left(\frac{1}{2(1+k \cos \theta)} + \cos \theta\right) -$$

$$- D'_{12} \frac{2k}{a^4 (1+k \cos \theta)^3} (k + \cos \theta) - C_{12} \frac{a^2 k \cos \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)^3} \left(3k \cos \theta + \frac{1+k^3 \cos \theta}{1+k \cos \theta}\right) \frac{\partial}{\partial \theta} -$$

$$- D''_{12} \frac{k \sin \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)^4} (1+2k \cos \theta + k^2 \cos^2 \theta) - C_{11} \frac{1}{a^2 (1+k \cos \theta)^4} (1+4k \cos \theta + 6k^2 \cos^2 \theta +$$

$$+ 4k^3 \cos^3 \theta + k^4 \cos^4 \theta) \frac{\partial}{\partial \theta} - D_{12} \frac{2k}{a^4 (1+k \cos \theta)^4} (k + \cos \theta + k^2 \cos \theta + k \cos^2 \theta) \frac{\partial}{\partial \theta} -$$

$$- D'_{12} \frac{2k \sin \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)^4} (1+4k \cos \theta + 2k^2 \cos^2 \theta) \frac{\partial}{\partial \theta} - D_{12} \frac{k \sin \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)^4} (1+2k \cos \theta + k^2 \cos^2 \theta) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$$

$$L_{22}(C_{ij}C'_{ij}D_{ij}D'_{ij}) = -C_{11} \frac{1}{a^2 (1+k \cos \theta)^2} (1+2k \cos \theta + k^2 \cos^2 \theta) - C_{12} \frac{2k \cos \theta}{a^2 (1+k \cos \theta)} -$$

$$- C_{22} \frac{k^2 \cos^2 \theta}{a^2 (1+k \cos \theta)^2} + D'_{12} \frac{2k \cos \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{k \sin \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)} (D'_{12} - D_{12}) \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{k \cos \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)} (D_{11} +$$

$$+ 2D_{12}) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + (D'_{11} + D'_{12}) \frac{k}{a^4 (1+k \cos \theta)^2} (2 \sin \theta + k \sin 2\theta) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} - D''_{11} \frac{1}{a^4 (1+k \cos \theta)^2} (1+2k \cos \theta +$$

$$+ k^2 \cos^2 \theta) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + D_{11} \frac{k}{a^4 (1+k \cos \theta)^2} (2 \sin \theta + k \sin 2\theta) \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} + D_{12} \frac{k \sin \theta}{a^4 (1+k \cos \theta)} \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} -$$

$$- D'_{11} \frac{2}{a^4 (1+k \cos \theta)^2} (1+4k \cos \theta + k^2 \cos^2 \theta) \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} - D_{11} \frac{1}{a^4 (1+k \cos \theta)^2} (1+2k \cos \theta + k^2 \cos^2 \theta) \frac{\partial^4}{\partial \theta^4}$$

Для замкненої в обох напрямках кругової тороїдальної оболонки рішення повинно задовольняти періодичності відносно кута θ , тому знаходиться воно в вигляді:

$$u(\theta) = \sum_{m=0}^{\infty} u_m \sin(m\theta),$$

$$w(\theta) = \sum_{m=0}^{\infty} w_m \cos(m\theta). \quad (9)$$

Інтегруючи рівняння рівноваги за методом Бубнова-Гальоркіна по θ і ψ по поверхні тору, приймається до уваги, що елемент площі тору дорівнює:

$$ABd\theta d\psi = \left[\frac{a^2(1+k \cos \theta)}{k} \right] d\theta d\psi.$$

Отримуємо систему безкінечних лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned}\sum_{m=0}^M (L_{11m}u_m + L_{21m}w_m) &= 0, \\ \sum_{m=0}^M (L_{21m}u_m + L_{22m}w_m) &= p.\end{aligned}\quad (10)$$

6 ОЦІНКА МІЦНОСТІ КОРПУСУ ПІДВОДНОГО АПАРАТУ ТОРОЇДАЛЬНОЇ ФОРМИ

6.1 Для розрахунку напружень в тороїдальному міцному корпусі використовуються формули:

$$\sigma_\theta = \frac{T_1}{h} + \frac{12M_1}{h^3}\gamma, \quad \sigma_\psi = \frac{T_2}{h}, \quad \tau_{\theta\psi} = \left(\frac{3}{2h} - \frac{6\gamma^2}{h^3}\right)N_1, \quad (11)$$

де, $h = h_1l_1 + h_2l_2$ – загальна товщина пакету стінки оболонки.

6.2 Оцінка міцності тороїдального корпусу проводиться за допомогою комбінованого енергетичного критерію Цай-Ву-Гофмана для плоского напруженого стану, визначеного за наступною формулою:

$$CF_{CS} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 + 4a}}{2a}$$

$$a = \frac{\sigma_\theta^2}{[\sigma_{\theta\theta,P} \cdot \sigma_{\theta\theta,C}]} + \frac{\sigma_\psi^2}{[\sigma_{\psi\psi,T} \cdot \sigma_{\psi\psi,C}]} - \frac{\sigma_\theta \sigma_\psi}{[\sigma_{\theta\theta,T} \cdot \sigma_{\psi\psi,C}]} + \frac{\tau_{\theta\psi}^2}{\tau_{\theta\psi}^2}, \quad b = \frac{[\sigma_{\theta\theta,C}]/[\sigma_{\theta\theta,T}]}{[\sigma_{\theta\theta,T} \cdot \sigma_{\psi\psi,C}]} \cdot \sigma_\theta + \frac{[\sigma_{\psi\psi,C}]/[\sigma_{\psi\psi,T}]}{[\sigma_{\psi\psi,T} \cdot \sigma_{\theta\theta,C}]} \cdot \sigma_\psi$$

де, σ_θ , σ_ψ , $\tau_{\theta\psi}$ – розрахункові місцеві напруження в індивідуальному шарі в осях армування;

$\sigma_{\theta\theta,P}$, $\sigma_{\theta\theta,C}$, $\sigma_{\psi\psi,P}$, $\sigma_{\psi\psi,C}$, $\tau_{\theta\psi}$ – руйнівні напруження [1].

Руйнівні напруження визначаються, як функції руйнуючих деформацій за законом Гука.

$$\sigma_{\theta\theta} = \varepsilon_{\theta\theta} \times E_1 \times Coef_{res}, \quad \sigma_{\psi\psi} = \varepsilon_{\psi\psi} \times E_2 \times Coef_{res}, \quad \tau_{\theta\psi} = \gamma_{\theta\psi} \times G_{\theta\psi} \times Coef_{res},$$

де, $\varepsilon_{\theta\theta}$, $\varepsilon_{\psi\psi}$, $\gamma_{\theta\psi}$ – теоретична руйнуюча відносна деформація розтягування, стискання та зсуву елементарного шару в напрямках 1 та 2 місцевої системи координат, що знайдена для шару експериментально;

$Coef_{res}$ – коефіцієнт, що враховує адгезійні властивості сполучника [1].

Умова міцності має вид:

$$CF_{CS} \geq CF,$$

де CF – коефіцієнт безпеки [1].

6.3 Перевірка оболонки на стійкість проводиться за методикою [2] з урахуванням уточнених значень пружних постійних по п.4.2.

Міцність і стійкість повинні бути забезпечені.

7 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Bureau Veritas: Hull in Composite Materials and Plywood, Material Approval, Design Principles, Construction and Survey. March 2012 / Rule Note NR 546 DT R00 E
2. «Методика разработки схемы армирования прочного тороидального корпуса из полимерных композиционных материалов с позиции устойчивости и прочности». № УКФА. 362111. 001. М – 2010.

ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МІЦНОГО КОРПУСУ ТОРОЇДАЛЬНОЇ ФОРМИ ДЛЯ ПІДВОДНИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

Розрахунок НДС міцного корпусу тороїдальної форми виконується за
допомогою програми Махіта на прикладі склопластика (S-2 GLASS/ЕДТ-10)

NOTEBOOK

Вихідні дані:

$$E_m = 3. \times 10^9;$$

$$E_v = 93. \times 10^9;$$

$$E_{v90} = 93. \times 10^9;$$

$$\mu_v = 0.32;$$

$$\mu_m = 0.32;$$

$$\eta = 0.6;$$

$$h_2 = 0.25 \times 10^{-3};$$

$$l_1 = 70.;$$

$$l_2 = 70.;$$

$$a = 1.;$$

$$k = 1 / 3;$$

$$C_{ud1} = 0.95;$$

$$C_{ud2} = 1;$$

$$C_{ud12} = 1.05;$$

$$C_{ud\mu} = 0.9;$$

$$Z = 100. \times 10^5;$$

Коефіцієнти Ламе:

$$B = a (1 + k \cos[\theta]) / k;$$

$$A = a;$$

Главні кривизни:

$$k_2 = \cos[\theta] / B;$$

$$k_1 = 1 / A;$$

Рішення в переміщеннях:

$$u[\theta] = \sum_{m=0}^5 u_m \sin[m\theta];$$

$$w[\theta] = \sum_{m=0}^5 w_m \cos[m\theta];$$

Закон зміни товщини поперечного шару:

$$h1[\theta] = h2 (1 + k) (1 - k \cos[\theta] + k^2 \cos[\theta]^2 - k^3 \cos[\theta]^3);$$

Геометричні співвідношення:

$$\epsilon1 = 1 / A D[u[\theta], \theta] + k1 w[\theta];$$

$$\epsilon2 = k2 w[\theta] + 1 / (A B) D[B, \theta] u[\theta];$$

$$\chi1 = -1 / A D[1 / A D[w[\theta], \theta], \theta] + D[k1, \theta] u[\theta] / A;$$

$$\chi2 = -1 / (A^2 B) D[B, \theta] D[w[\theta], \theta] + D[k2, \theta] u[\theta] / A;$$

Коефіцієнти жорсткості:

$$E1 = Cud1 (Ev \eta + (1 - \eta) Em);$$

$$E2 = Cud2 (Em / (1 - \mu m^2) (1 + 0.85 \eta^2) / ((1 - \eta)^{1.25} + Em / Ev 90 \eta / (1 - \mu m^2)));$$

$$\mu1 = Cud\mu (\mu v \eta + (1 - \eta) \mu m);$$

$$\mu2 = \mu1 E2 / E1;$$

$$B11 = E1 / (1 - \mu1 \mu2);$$

$$B22 = E2 / (1 - \mu1 \mu2);$$

$$B12 = E2 \mu1 / (1 - \mu1 \mu2);$$

$$B21 = E1 \mu2 / (1 - \mu1 \mu2);$$

$$R1 = 1 / 12 h2 12 (B11 (12^2 + 3 11^2) + 2 12 B22 (12 + 3 11) + 2 (B11 - B22) (3 11 + 1));$$

$$R2 = 1 / 12 h2^2 12 (2 B11 12^2 + B22 12^2 + 3 12 11 B22 + 2 (B22 - B11));$$

$$R3 = 1 / 12 B22 (12 + 11)^3;$$

$$R4 = 1 / 12 B11 h2^3 12^3;$$

$$R5 = 1 / 12 h2 12 (12^2 (2 B11 + B22) + 3 11 (2 11 B11 + 12 B22) + 2 (B22 - B11) (3 11 + 1));$$

$$R6 = 1 / 12 h2^2 12 (12^2 (B11 + 2 B22) + 3 B11 12 11 + 2 (B11 - B22));$$

$$R7 = 1 / 12 B11 (12 + 11)^3;$$

$$R8 = 1 / 12 B22 h2^3 12^3;$$

$$R9 = 1 / 12 B12 (12 + 11)^3;$$

$$R10 = 3 / 12 B12 (12 + 11)^2 12 h2;$$

$$R11 = 3 / 12 B12 (12 + 11) 12^2 h2^2;$$

$$R12 = 1 / 12 B12 h2^3 12^3;$$

```

R14 = B22 (11 + 12) ;
R15 = B22 12 h2;
R16 = B11 (11 + 12) ;
R17 = B12 12 h2;
R18 = B12 (11 + 12) ;
D11[θ] = R1 h1[θ]^2 + R2 h1[θ] + R3 h1[θ]^3 + R4;
D22[θ] = R5 h1[θ]^2 + R6 h1[θ] + R7 h1[θ]^3 + R8;
D12[θ] = R9 h1[θ]^3 + R10 h1[θ]^2 + R11 h1[θ] + R12;
C11[θ] = R13 + R14 h1[θ] ;
C22[θ] = R15 + R16 h1[θ] ;
C12[θ] = R17 + R18 h1[θ] ;

```

Сили та моменти:

```

T1 = C11[θ] ε1 + C12[θ] ε2;
T2 = C22[θ] ε2 + C12[θ] ε1;
S = 0;
M1 = D11[θ] χ1 + D12[θ] χ2;
M2 = 0;
H = 0;
N1 = D[B M1, θ] / (A B) ;
N2 = 0;

```

Система рівнянь рівноваги:

```

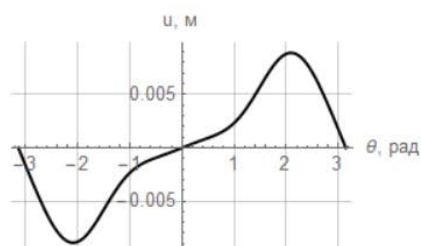
s =
  Solve[{ ( D[B T1, θ] - D[B, θ] T2 + A B k1 N1 == 0,
    - (k1 T1 + k2 T2) + 1 / (A B) D[B N1, θ] == Z),
    {u1, u2, u3, u4, u5, w0, w1, w2, w3, w4, w5} ] ;
U1 = u1 /. s[[1, 1]] ;
U2 = u2 /. s[[1, 2]] ;
U3 = u3 /. s[[1, 3]] ;
U4 = u4 /. s[[1, 4]] ;
U5 = u5 /. s[[1, 5]] ;
W0 = w0 /. s[[1, 6]] ;
W1 = w1 /. s[[1, 7]] ;
W2 = w2 /. s[[1, 8]] ;
W3 = w3 /. s[[1, 9]] ;
W4 = w4 /. s[[1, 10]] ;
W5 = w5 /. s[[1, 11]] ;

```

Переміщення:

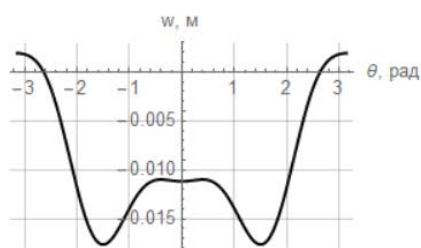
$$u = U1 \sin[1 \theta] + U2 \sin[2 \theta] + U3 \sin[3 \theta] + U4 \sin[4 \theta] + U5 \sin[5 \theta];$$

```
Plot[{u}, {θ, -π, π}, PlotStyle → {Black}, GridLines → Automatic,
  AxesLabel → {"θ, рад", "u, м"}]
```



$$w = W0 \cos[\theta] + W1 \cos[1 \theta] + W2 \cos[2 \theta] + W3 \cos[3 \theta] + W4 \cos[4 \theta] + W5 \cos[5 \theta];$$

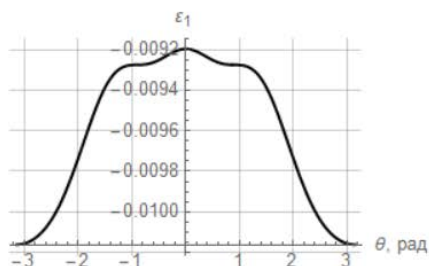
```
Plot[{w}, {θ, -π, π}, PlotStyle → {Black}, GridLines → Automatic,
  AxesLabel → {"θ, рад", "w, м"}]
```



Деформації:

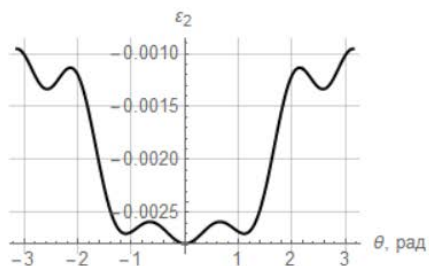
$$\epsilon_1 = 1 / AD[u, \theta] + k_1 w;$$

```
Plot[{ε1}, {θ, -π, π}, PlotStyle → {Black}, GridLines → Automatic,
  AxesLabel → {"θ, рад", "ε1"}]
```



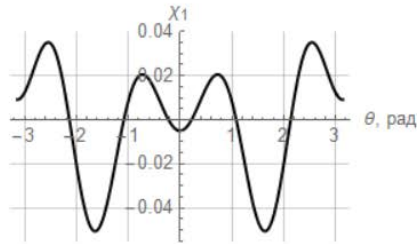
$$\epsilon_2 = k_2 w + 1 / (AB) D[B, \theta] u;$$

```
Plot[{ε2}, {θ, -π, π}, PlotStyle → {Black}, GridLines → Automatic,
  AxesLabel → {"θ, рад", "ε2"}]
```



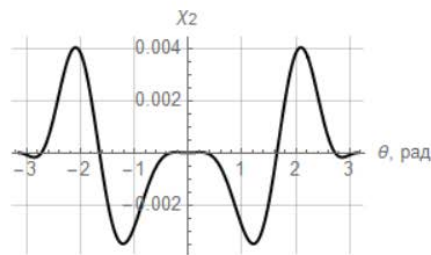
```
x1 = -1 / AD[1 / AD[w,  $\theta$ ],  $\theta$ ] + D[k1,  $\theta$ ] u / A;
```

```
Plot[{x1}, { $\theta$ , - $\pi$ ,  $\pi$ }, PlotStyle -> {Black}, GridLines -> Automatic,  
AxesLabel -> {" $\theta$ , рад", "x1"}]
```



```
x2 = -1 / (A^2 B) D[B,  $\theta$ ] D[w,  $\theta$ ] + D[k2,  $\theta$ ] u / A;
```

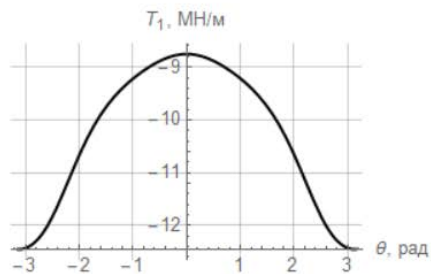
```
Plot[{x2}, { $\theta$ , - $\pi$ ,  $\pi$ }, PlotStyle -> {Black}, GridLines -> Automatic,  
AxesLabel -> {" $\theta$ , рад", "x2"}]
```



T1

```
T15 = C11[ $\theta$ ] (1 / AD[u,  $\theta$ ] + k1 w) + C12[ $\theta$ ] (k2 w + 1 / (A B) D[B,  $\theta$ ] u);
```

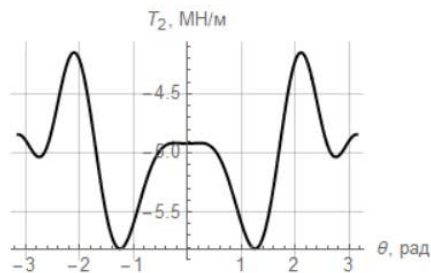
```
Plot[{T15 / 10^6}, { $\theta$ , - $\pi$ ,  $\pi$ }, PlotStyle -> {Black}, GridLines -> Automatic,  
AxesLabel -> {" $\theta$ , рад", "T1, МН/м"}]
```



T2

```
T25 = C22[ $\theta$ ] (k2 w + 1 / (A B) D[B,  $\theta$ ] u) + C12[ $\theta$ ] (1 / AD[u,  $\theta$ ] + k1 w);
```

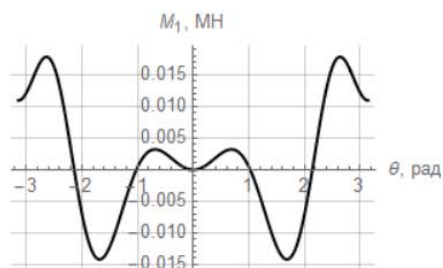
```
Plot[{T25 / 10^6}, { $\theta$ , - $\pi$ ,  $\pi$ }, PlotStyle -> {Black}, GridLines -> Automatic,  
AxesLabel -> {" $\theta$ , рад", "T2, МН/м"}]
```



M1

```
M15 = D11[θ] (-1 / A D[1 / A D[w, θ], θ] + D[k1, θ] u / A) +
      D12[θ] (-1 / (A^2 B) D[B, θ] D[w, θ] + D[k2, θ] u / A);
```

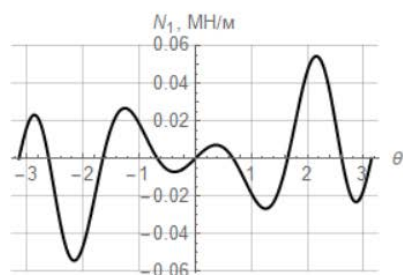
```
Plot[{M15 / 10^6}, {θ, -π, π}, PlotStyle -> {Black}, GridLines -> Automatic,
      AxesLabel -> {"θ, рад", "M1, МН"}]
```



N1

```
N15 = D[B M15, θ] / (A B);
```

```
Plot[{N15 / 10^6}, {θ, -π, π}, PlotStyle -> {Black}, PlotLegends -> {"N15"},
      GridLines -> Automatic, AxesLabel -> {"θ", "N1, МН/м"}]
```



Розрахунок напружень

Руйнуючі напруження

```
εbrθr = 2.9 / 100;
```

```
εbrψr = 0.395 / 100;
```

```
εbrθc = 1.8 / 100;
```

```
εbrψc = 1.3 / 100;
```

```
Coef = 1;
```

```
σbrθr = εbr1r E1 Coef;
```

```
σbrψr = εbr2r E2 Coef;
```

```
σbrθc = εbr1c E1 Coef;
```

```
σbrψc = εbr2c E2 Coef;
```

Напряжения

Зовнішня поверхня

```
h1 = h2 (1 + k) (1 - k Cos[θ] + k^2 Cos[θ]^2 - k^3 Cos[θ]^3);
```

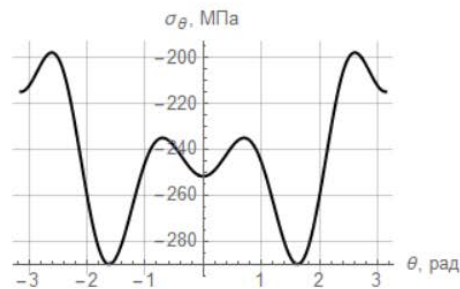
```
σθ5T1 = T15 / (h1 11 + h2 12);
```

```
σθ5M1 = 12 M15 / (h1 11 + h2 12)^3 (h2 12 + h1 11) / 2;
```



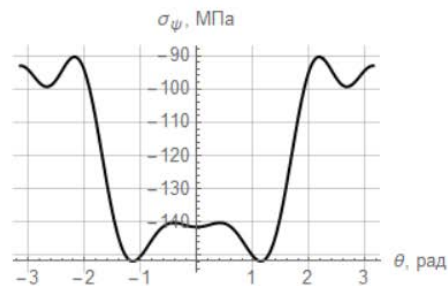
```
 $\sigma_{\theta 5} = T15 / (h1\ 11 + h2\ 12) + 12\ M15 / (h1\ 11 + h2\ 12)^3 (h2\ 12 + h1\ 11) / 2;$ 
```

```
Plot[{ $\sigma_{\theta 5} / 10^6$ }, { $\theta$ , - $\pi$ ,  $\pi$ }, PlotStyle -> {Black}, GridLines -> Automatic,  
AxesLabel -> {" $\theta$ , рад", " $\sigma_{\theta}$ , МПа"}]
```



```
 $\sigma_{\psi 5} = T25 / (h1\ 11 + h2\ 12);$ 
```

```
Plot[{ $\sigma_{\psi 5} / 10^6$ }, { $\theta$ , - $\pi$ ,  $\pi$ }, PlotStyle -> {Black}, GridLines -> Automatic,  
AxesLabel -> {" $\theta$ , рад", " $\sigma_{\psi}$ , МПа"}]
```



```
 $\tau_{\theta \psi 5} = 0;$ 
```

Критерій Цай - Ву - Гофмана

```
CF = 2.59;
```

```
 $i = \sigma_{\theta 5}^2 / \text{Abs}[\sigma_{br\theta r} \sigma_{br\theta c}] + \sigma_{\psi 5}^2 / \text{Abs}[\sigma_{br\psi r} \sigma_{br\psi c}] -$   
 $\sigma_{\theta 5} \sigma_{\psi 5} / \text{Abs}[\sigma_{br\theta r} \sigma_{br\theta c}] + \tau_{\theta \psi 5}^2 / \tau_{br\theta \psi};$ 
```

```
 $j = (\text{Abs}[\sigma_{br\theta c}] - \text{Abs}[\sigma_{br\theta r}]) / \text{Abs}[\sigma_{br\theta r} \sigma_{br\theta c}] \sigma_{\theta 5} +$   
 $(\text{Abs}[\sigma_{br\psi c}] - \text{Abs}[\sigma_{br\psi r}]) / \text{Abs}[\sigma_{br\psi r} \sigma_{br\psi c}] \sigma_{\psi 5};$ 
```

```
 $y1 = -j + \sqrt{j^2 + 4\ i} / (2\ i);$ 
```

```
 $y2 = -j - \sqrt{j^2 + 4\ i} / (2\ i);$ 
```

```
Max[y1, y2]
```

```
2.61
```

```
Clear[ $\theta$ ]
```

Внутрішня поверхня

```
 $h1 = h2 (1 + k) (1 - k \cos[\theta] + k^2 \cos[\theta]^2 - k^3 \cos[\theta]^3);$ 
```

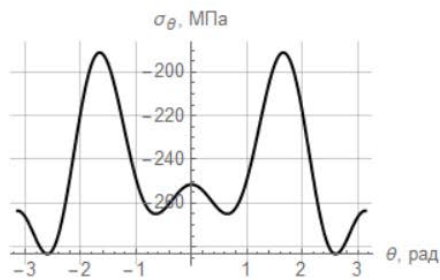
```
 $\sigma_{\theta 5 T1} = T15 / (h1\ 11 + h2\ 12);$ 
```

```
 $\sigma_{\theta 5 M1} = 12\ M15 / (h1\ 11 + h2\ 12)^3 (- (h2\ 12 + h1\ 11) / 2);$ 
```

```
 $\sigma_{\theta 5} = T15 / (h1\ 11 + h2\ 12) + 12\ M15 / (h1\ 11 + h2\ 12)^3 (- (h2\ 12 + h1\ 11) / 2);$ 
```

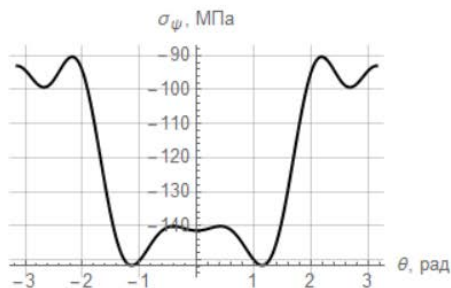


```
Plot[{σθ5}, {θ, -π, π}, PlotStyle → {Black}, GridLines → Automatic,
  AxesLabel → {"θ, рад", "σθ, МПа"}]
```



```
σψ5 = T25 / (h1 l1 + h2 l2);
```

```
Plot[{σψ5}, {θ, -π, π}, PlotStyle → {Black}, PlotLegends → {"σψ5"},
  GridLines → Automatic, AxesLabel → {"θ, рад", "σψ, МПа"}]
```



```
τθψ5 = 0;
```

Критерий Цай - Ву - Гофмана

```
CF = 2.59;
```

```
Clear[i, j, y1, y2]
```

```
i = σθ5^2 / Abs[σbrθr σbrθc] + σψ5^2 / Abs[σbrψr σbrψc] -
  σθ5 σψ5 / Abs[σbrθr σbrθc] + τθψ5^2 / τbrθψ;
```

```
j = (Abs[σbrθc] - Abs[σbrθr]) / Abs[σbrθr σbrθc] σθ5 +
  (Abs[σbrψc] - Abs[σbrψr]) / Abs[σbrψr σbrψc] σψ5;
```

```
y1 = -j + √(j^2 + 4 i) / (2 i);
```

```
y2 = -j - √(j^2 + 4 i) / (2 i);
```

```
Max[y1, y2]
```

```
2.6
```

Аналіз стійкості:

- щільність морської води

$$\rho_w = 1027;$$

- робоча глибина занурення

$$H_{SW} = 1000;$$

- прискорення вільного падіння

$$g = 9.8;$$

- коефіцієнт запасу стійкості

$$f_s = 2;$$

- розрахунковий зовнішній тиск

$$q_{SW} = \rho_w g H_{SW} f_s;$$

- кількість півхвиль втрати стійкості

$$n = 4;$$

$$F_1 = 1 / 256 (128 + 32 k^2 + 16 k^4 + 10 k^6 + 7 k^8);$$

$$F_2 = 1 / 256 (128 + 96 k^2 + 80 k^4 + 70 k^6 + 63 k^8);$$

$$F_3 = 1 / 256 (128 + 192 k^2 + 240 k^4 + 280 k^6 + 315 k^8);$$

$$F_4 = 1 / 128 (128 + 64 k^2 + 48 k^4 + 40 k^6 + 35 k^8);$$

$$F_5 = 1 / 128 (128 + 192 k^2 + 240 k^4 + 560 k^6 + 315 k^8);$$

$$\begin{aligned} q_v = & k^2 / (a n^2 (1 + k^2 / 4)) \\ & ((1 / 2 R_{13} + R_{17}) + (1 / k^2 R_{16} + R_{14} F_2) h_1 (1 + k) + \\ & n^2 / a^2 ((R_{12} + R_4 + R_8) 1 / 2 + (R_2 - R_{11}) h_1 (1 + k) F_1 + \\ & (R_1 - 2 (R_5 + R_{10})) h_1^2 (1 + k)^2 F_2 + \\ & ((R_3 - 7 R_9) F_3 + (R_9 - R_7) F_5) h_1^3 (1 + k)^3 + (1 / k^2 + 1 / 2) R_{15} + \\ & n^4 / (a^2 k^2) \\ & (R_7 h_1^3 (1 + k)^3 F_4 + R_5 h_1^2 (1 + k)^2 + R_6 h_1 (1 + k) + R_8 (1 + k^2 / 2)) - \\ & n^2 (1 / 2 R_{17} + 1 / k^2 (R_{15} (1 + k^2 / 2) + R_{16} h_1 (1 + k))) / \\ & (- (1 / 2 (R_{13} - 3 R_{17}) + (R_{14} - 3 R_{18}) h_1 (1 + k) F_1) + \\ & n^2 / k^2 (R_{15} (1 + k^2 / 2) + R_{16} h_1 (1 + k))) \\ & (1 / k^2 (R_{15} (1 + k^2 / 2) + R_{16} h_1 (1 + k)) + 1 / (2 a^2) (R_4 + R_{12}) + \\ & 1 / a^2 (R_2 + R_{11}) h_1 (1 + k) F_1 + 1 / a^2 (R_1 + R_{10}) h_1^2 (1 + k)^2 F_2 + \\ & 1 / a^2 (R_3 + R_9) h_1^3 (1 + k)^3 F_3 + 1 / 2 R_{17} + \\ & n^2 / (a^2 k^2) (R_8 (1 + k^2 / 2) + R_6 h_1 (1 + k) + R_5 h_1^2 (1 + k)^2 + \\ & R_7 h_1^3 (1 + k)^3 F_4))) ; \end{aligned}$$

Коефіцієнт корисної дії

$$\gamma_v = q_v / q_{SW}$$

$$1.01398$$

Умова міцності і стійкості для обраної оболонки

ДОДАТОК Б

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи



Акт впровадження
Результатів розробок кандидатської дисертації
Присташ Світлани Федорівни

«Удосконалення методу розрахунку міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми, виготовленого намотуванням» у навчальному процесі в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова

Результати дисертаційної роботи Присташ С.Ф. використовуються в навчальному процесі підготовки бакалаврів та магістрів кораблебудівного навчально-наукового інституту, при викладенні дисциплін спеціальності 135 «Суднобудування»:

1. «Будівельна механіка корабля та ТЗОО» при викладенні теми «Розрахунок міцності і стійкості оболонок»;
та спеціальності 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»:

1. «Механіка і міцність конструкцій із композиційних матеріалів» при викладенні теми «Механіка ортотропних оболонок»;
2. «Проектування та конструювання виробів із КМ» при викладенні теми «Нормативна та конструкторська документація».

Директор кораблебудівного
навчально-наукового інституту
к.т.н., професор

О.В. Бондаренко

Заступник директора
кораблебудівного
навчально-наукового інституту

О.П. Ястреба



**ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН “УКРОБОРОНПРОМ”
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
“МИКОЛАЇВСЬКИЙ СУДНОБУДІВНИЙ ЗАВОД”**
Вул. Адміральська, 38, м. Миколаїв, 54001;

Акт впровадження
результатів кандидатської дисертації
Присташ Світлани Федорівни
**«Удосконалення методу розрахунку міцності корпусу підводного апарату
тороїдальної форми, виготовленого намотуванням»**

Комісія в складі:

Голова -	Генеральний директор - Калашніков В.М.
Члени комісії -	Начальник Технічного відділу - Недобой В.В.
	інженер - конструктор 1 категорії - Розумна І.М.

склала цей акт про те, що «Методика розрахунку напружено-деформованого стану міцного корпусу підводного апарату тороїдальної форми при гідростатичному стисканні з урахуванням конструктивно-технологічних факторів виготовлення його способом намотування волокном із ПКМ» (№ УКФА. 362111.002.М. НУК ім. адм. Макарова, 2020 р.), автор Присташ С.Ф., впроваджується на ДП «Миколаївський суднобудівний завод».

Удосконалений метод для оцінки міцних корпусів підводних апаратів тороїдальної форми дозволяє спрогнозувати проектні параметри на початковій стадії проектування. Це значно спрощує витрати на виконання конструкторських і дослідно-довідних робіт, у результаті чого одержується економічний ефект.

Даний акт не може бути підставою для отримання будь-яких коштів з фонду підприємства.

Голова

Генеральний директор

В.М.Калашніков

Члени комісії:

Начальник Технічного відділу

В.В.Недобой

Інженер - конструктор 1 категорії

І.М.Розумна



ДОДАТОК В

Список публікацій за темою дисертації

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових фахових виданнях:

1. Присташ С.Ф., Бурдун Є.Т. Метод розрахунку міцного корпусу підводного апарату в формі тору, виконаного намотуванням. *Вісник Одеського національного морського університету*. Одеса, 2017. № 4 (53). С. 152–163. (Журнал входить до переліку наукових фахових видань України, затвердженому МОН України, та у міжнародну наукометричну базу РИНЦ)
2. Sizonenko O., Burdun E., Prystash S. Peculiarities of stress-strain state of toroidal pressure hull, made by winding. *International journal for science, technics and innovations for the industry. Machines, Technologies, Materials, PRINT* ISSN 1313 – 0226, ISSN WEB 1314-507X, Year XII Issue, 6/2018. – P. 240-243 (Журнал входить у міжнародні наукометричні бази Google Scholar, Index Copernicus, WorldCat, CAS, ROAD, eLibrary, National German Library in Leipzig)
3. Sizonenko O., Burdun E., Prystash S. Peculiarities of stress-strain state of toroidal pressure hull, made by spiral winding. *International journal for science, technics and innovations for the industry. Machines, Technologies, Materials, PRINT* ISSN 1313 – 0226, ISSN WEB 1314-507X, Year XII, Issue 11/2018. – P. 466-469 (Журнал входить у міжнародні наукометричні бази Google Scholar, Index Copernicus, WorldCat, CAS, ROAD, eLibrary, National German Library in Leipzig)
4. Присташ С.Ф. Аналіз стану та проблем розрахунку напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу для підводних апаратів. *Вісник Одеського національного морського університету*. Одеса, 2020. № 1 (61). С. 55–69. (Журнал входить до переліку наукових фахових видань України, затвердженому МОН України, та у міжнародну наукометричну базу РИНЦ)

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Бела С.Ф., Бурдун Є.Т. Рівняння згину тонкостінної ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини із полімерних композиційних

матеріалів. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. Участю (Миколаїв, 22–24 трав. 2013 р.). Миколаїв: НУК, 2013. С. 220-223. (Форма участі - очна)

6. Бела С.Ф. Рівняння згину замкненої ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини виконаної намотуванням. *Макаровські читання*: матеріали конференції всеукраїнського форуму молодих науковців, присвячений Дню науки (Миколаїв, 23-24 травня 2013 р.). Миколаїв: НУК, 2013. С. 17-18.

7. Бела С.Ф., Бурдун Є.Т. Рівняння згину замкненої ортотропної тороїдальної оболонки змінної товщини виконаної намотуванням. *Композиционные материалы в промышленности*: матеріали 33 Міжнародної конференції (СЛАВПОЛИКОМ) (Ялта, 27-31 травня 2013р). Ялта, 2013р. С. 226-227. (Форма участі - очна)

8. Бела С.Ф. Рівняння згину міцного корпусу підводного апарату в формі тора виконаного спіральним намотуванням. *Підводна техніка і технологія*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 5-7 листопада 2014 р.). Миколаїв: НУК, 2014 р. С. 5-7. (Форма участі - очна)

9. Бела С.Ф. Рівняння згину тороїдального міцного корпусу для підводно-технічних засобів виконаних спіральним намотуванням. *Макаровські читання*: матеріали конференції всеукраїнського форуму молодих науковців (Миколаїв, 22-23 травня 2014 р.). Миколаїв: НУК, 2014 р. С. 17. (Форма участі - очна)

10. Белая С.Ф., Петрюк О.В. Напряженное состояние прочного корпуса подводного аппарата в форме тора из композиционных материалов. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції (Миколаїв, 20-22 травня 2015 р.). Миколаїв: НУК, 2015 р. С. 98. (Форма участі - очна)

11. Белая С.Ф. Эффективность использования полимерных композиционных материалов для тороидальных прочных корпусов подводных

аппаратов выполненных намоткой. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування*: матеріали 6-тої Міжнародної науково-практичної конференція (Херсон, 24-25 вересня 2015 р). Херсон: Херсонська державна морська академія, 2015 р. С. 168 – 169. (Форма участі - заочна)

12. Белая С.Ф., Петрюк О.В. Эффективность использования полимерных композиционных материалов для тороидальных прочных корпусов подводных аппаратов. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференція (Миколаїв, 24 – 27 вересня 2015.). Миколаїв: НУК, 2015. С. 57-59. (Форма участі - очна)

13. Белая С.Ф., Бурдун Е.Т. Влияние схемы намотки на прочность тороидального прочного корпуса подводного аппарата при гидростатическом сжатии. *Підводна техніка і технологія*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 18-20 листопада 2015 р.). Миколаїв: НУК, 2015 р. С. 3 - 6. (Форма участі - очна)

14. Бурдун Е.Т., Белая С. Ф., Оценка эффективности использования композиционных материалов для тороидальных прочных корпусов. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 19-20 травня 2016 р.). Миколаїв: НУК, 2016 р. С 110 – 112. (Форма участі - очна)

15. Белая С. Ф., Бурдун Е.Т. Напряженно-деформированное состояние тороидального прочного корпуса подводного аппарата при различных схемах намотки. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції (Миколаїв, 12 – 14 жовтня 2016 р.). Миколаїв: НУК, 2016 р. С. 84–86. (Форма участі - очна)

16. Бурдун Є.Т., Присташ С.Ф. Напружено-деформований стан міцного корпусу підводного апарату в формі тору. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської конференції з міжнародною

участю (Миколаїв, 17-18 травня 2017 р.). Миколаїв: НУК, 2017 р. С 116 – 118. (Форма участі - очна)

17. Присташ С. Ф., Бурдун Е.Т. Напружено-деформований стан міцного корпусу підводного апарату у формі тору, виготовленого із ПКМ. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції (Миколаїв, 11 – 13 жовтня 2017 р.). Миколаїв: НУК, 2017 р. С. 117–118 (Форма участі - очна)

18. Бурдун Є.Т., Присташ С.Ф. Аналіз напружено-деформованого стану міцного корпусу підводно-технічних засобів в формі тору виконаних із ПКМ при різних схемах намотування. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю (Миколаїв, 23 – 24 травня 2018 р.). Миколаїв: НУК, 2018 р. С 81-82. (Форма участі - очна)

19. Присташ С. Ф. Про розрахунок міцного корпусу підводно-технічних засобів в формі тору виготовленого із ПКМ методом намотування. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті*: матеріали X міжнародної науково-практичної конференції (Херсон, 29 – 31 травня 2018 р.). Херсон: Херсонська державна морська академія, 2018 р. С. 238-239. (Форма участі - очна)

20. Бурдун Є.Т., Присташ С.Ф. Аналіз напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу підводно-технічного засобу, виготовленого спіральним намотуванням. *Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування*: матеріали V міжнародної науково-технічної конференції (Миколаїв, 17 – 19 жовтня 2018 р.). Миколаїв: НУК, 2018 р. С 20-21. (Форма участі - очна)

21. Присташ С.Ф. Особливості напружено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу виконаного намотуванням із ПКМ. *Сучасні технології обробки матеріалів*: матеріали всеукраїнської наукової конференції

(Миколаїв, 01 –02 листопаду 2018 р.). Миколаїв: ІПіТ НАН України, 2018 р. С 25. (Форма участі - очна)

22. Бурдун Е.Т., Присташ С. Ф., Гейко С.П., Копійка С.В.. Порівняння методів оцінки ефективних пружних характеристик тороїдального міцного корпусу підводного засобу виконаного намотуванням волокном. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції* (Миколаїв, 26 – 28 вересня 2019 р.). Миколаїв: НУК, 2019 р. С. 239–243 (Форма участі - очна)

23. Бурдун Є.Т., Присташ С.Ф. Аналіз впливу змінної товщини тороїдального корпусу підводного засобу на його напружено-деформований стан. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю* (Миколаїв, 20-21 травня 2020 р.). Миколаїв: НУК, 2020 р. С 111-114. (Форма участі - очна)